

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГРИЦЕНКО АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 550.832.57:550.838

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ
КОРИСНИХ КОМПОНЕНТІВ В ЗАЛІЗОРУДНОМУ МАСИВІ

05.11.13 - Прилади і методи контролю та визначення складу речовин

05 – Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ А. М. Гриценко

Науковий керівник Азарян Альберт Арамаїсович, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Гриценко А.М. – Удосконалення методів та засобів визначення вмісту корисних компонентів в залізорудному масиві – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, м. Київ, 2021.

Дисертація присвячена розробці та удосконаленню методів та засобів синхронного визначення вмісту заліза загального та заліза магнетитового в залізорудному масиві.

Основне наукове завдання дисертаційної роботи полягає у встановленні закономірностей зміни інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання гірською породою, залежно від її механічних і фізико-хімічних властивостей, стану поверхні свердловини, а також залежності магнітної сприйнятливості гірських порід від вмісту заліза пов'язаного з магнетитом, для оперативного контролю вмісту заліза в залізорудній сировині по стінці експлуатаційної свердловини.

Ідея роботи полягає в синхронному застосуванні результатів взаємодії магнітних і радіаційних полів з гірськими породами та залежно від їх фізико-хімічних властивостей визначити вміст заліза.

Метою дослідження є вирішення актуальної наукової задачі, що полягає в удосконаленні методів та засобів підвищення характеристик точності пристроїв визначення вмісту корисних компонентів (заліза загального та магнетитового) в залізорудній сировині шляхом синхронного використання результатів взаємодії радіаційних та електромагнітних полів з масивом гірських порід та врахування факторів, що заважають.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні задачі:

1. Виконати критичний аналіз літературних джерел та структурний

аналіз відомих розробок оперативного контролю вмісту корисних компонентів в залізорудній сировині;

2. Вибрати та обґрунтувати оптимальний метод визначення заліза магнетитового, розробити макет пристрою, що його реалізує та провести апробацію;

3. Вибрати та обґрунтувати метод визначення заліза загального, розробити макет пристрою для його реалізації, розробити математичну модель оптимізації геометрії зони вимірювання;

4. Провести комплекс лабораторних досліджень для визначення факторів, що впливають на точність вимірів, і надати оцінку ступеню впливу кожного з них;

5. Розробити методи та засоби синхронного визначення вмісту корисних компонентів у свердловинах та провести дослідження стабільності їх функціонування в лабораторних та промислових умовах.

Ідея підвищення точності вимірювань досягається шляхом застосування двох датчиків, що реалізують селективний гамма-гамма метод та магнітометричний, розміщення яких забезпечує вимірювання ідентичних об'єктів, а наявність встановленого достовірного кореляційного зв'язку вимірюваних параметрів, дозволяє виявити та виключити вплив деяких факторів.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії електромагнітних полів та іонізуючого випромінювання в масиві гірських порід для визначення вмісту корисних компонентів залізорудної сировини.

Предмет дослідження – методи та засоби визначення вмісту заліза загального і пов'язаного з магнетитом в вибухових свердловинах для оперативного контролю вмісту корисного компонента в умовах природного залягання гірських порід.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань застосований комплексний метод досліджень, що включає в себе теоретичні й інструментальні методи: планування експериментів, математичну обробку

їх результатів; аналіз фізико-хімічного складу руд в залежності від варіацій технологічних чинників, теоретичні узагальнення з використанням теорії взаємодії гамма-випромінювання та електромагнітних полів з гірськими породами, методи математичного, імітаційного та комп'ютерного моделювання, експериментальні дослідження в лабораторних і промислових умовах. У роботі використано теорії гірничої справи, електротехніки, радіометрії, алгоритмування та управління; для обробки та узагальнення отриманих даних застосовано методи чисельного і статистичного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше обґрунтовано та розроблено синхронний метод визначення якісних характеристик залізорудної сировини для підвищення точності оперативного контролю вмісту заліза загального та магнетитового у вибухових свердловинах на основі синергетичної композиції інтегрального потоку розсіяного низько-енергетичного гамма-випромінювання та величини магнітної сприйнятливості гірських порід.

2. Для зменшення впливу обводненості свердловини на точність вимірювання вмісту заліза загального обґрунтовано та розроблено метод, що базується на використанні масштабних коефіцієнтів і кореляційної залежності між залізом загальним і залізом магнетитовим.

3. Набув подальшого розвитку селективний гамма-гамма метод визначення вмісту заліза загального в сировині завдяки оптимізації геометричних параметрів зони вимірювання, що зменшує вплив нерівностей поверхні стінки свердловини на точність.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено макет пристрою для вимірювання магнітної сприйнятливості гірських порід на основі автогенераторного магнітометричного перетворювача, що дозволило визначати вміст заліза магнетитового в зразках залізної руди Криворізького басейну з похибкою, що не перевищує 0,81 % абс.;

2. Доведено доцільність використання в якості джерела іонізуючого випромінювання для селективного гамма-гамма методу ізотопу Am-241, що дозволяє визначити вміст заліза загального в рудах Криворізького басейну з похибкою, що не перевищує 0,78 % абс.;

3. Розроблено комбінований свердловинний пристрій для визначення якісних характеристик речовинного складу залізорудної сировини, який містить в єдиному корпусі селективний гамма-гамма, та магнітометричний канали, конструктивне розміщення яких забезпечує внесення в їх вимірювальну зону ідентичних досліджуваних об'єктів;

4. Виконана інтеграція комбінованого свердловинного пристрою в мобільну станцію «Кар'єр-Кривбас» та проведена модернізація дозволила отримувати на екрані оператора станції синхронно кількісні значення розподілу заліза загального та заліза магнетитового по глибині свердловини миттєво, в момент проведення вимірювань, без додаткових витрат часу на обробку даних;

5. Комбінований свердловинний пристрій в складі мобільної станції «Кар'єр-Кривбас» впроваджений на партії рудникової шахтної геофізики державного підприємства «Укрчорметгеологія» та кар'єрі гірничо-збагачувального комплексу «Укрмеханобр» ПрАТ «ММК ім. Ілліча».

У вступі обґрунтовано вибір теми дисертації, актуальність проблеми, сформульовано мету й завдання досліджень, визначено об'єкт, предмет та ідею роботи, сформульовано наукову новизну й основні теоретичні і практичні результати дисертації, особистий внесок здобувача, а також дані про апробацію й публікації досліджень, структуру роботи.

У першому розділі розглянуто сучасний стан контролю показників вмісту корисних компонентів в залізорудній сировині, при її видобутку відкритим способом. Виконано аналіз систем та способів контролю, визначено їх недоліки; узагальнено переваги методів неруйнівного контролю якості руд.

Розглянуто магнітометричний метод, який базується на використанні залежності величини магнітної сприйнятливості (χ) гірських порід від кількості в них магнетиту ($Fe_{\text{магн}}$). Визначено, що для переважної більшості родовищ магнетитових кварцитів, в тому числі й Криворізького басейну, відмінною рисою є залежність $\chi = f(Fe_{\text{магн}})$ з високою надійністю апроксимації ($r = 0.85 \dots 0.95$), що є сприятливою і основоположною передумовою для кількісного визначення вмісту заліза магнетитового.

Поряд з необхідністю опробування залізних руд по залізу магнітному, в процесі видобутку існує проблема оперативного контролю якості руд по залізу загальному. Для цієї мети ще в 60-х ХХ сторіччя роках був запропонований гамма-гамма метод в селективному варіанті, що заснований на вимірюванні ефектів взаємодії гамма-квантів низької енергії ($E \leq 300$ кеВ) з речовиною. Визначення вмісту заліза загального спирається на наявність тісного кореляційного зв'язку між масовою часткою корисного компоненту, щільністю породи та показником інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання.

Критичний аналіз методів та пристроїв визначення вмісту корисних компонентів в залізорудному масиві показав, що магнітометричний метод є найбільш придатним для визначення вмісту заліза магнетитового, а гамма-гамма метод в селективному варіанті - для визначення вмісту заліза загального.

У другому розділі розглянуто особливості магнітометричного методу визначення вмісту заліза магнетитового, та найбільш доцільний і можливий для використання в умовах вибухової свердловини – індуктивний. Цей метод заснований на зміні індуктивності електричної вимірювальної котушки при внесенні феромагнітного матеріалу з деякою магнітною сприйнятливістю в змінне електромагнітне поле, створюване даною котушкою.

Для реєстрації магнітної сприйнятливості гірських порід в природних умовах їх залягання, була розроблена функціональна схема і виготовлений макет автогенераторного магнітометричного перетворювача (МП). За

допомогою цієї установки було встановлено залежність показника вмісту заліза магнетитового від магнітної сприйнятливості.

У четвертому розділі розглянуто фактори, що впливають на точність вимірювання вмісту корисного компоненту. При застосуванні гамма-гамма методу істотний вплив здійснюють чинники, пов'язані зі зміною фізичних і хімічних властивостей досліджуваних речовин, а також мінливість геометричних умов вимірювань, тобто: елементний склад гірських порід і руд, їх вологість, відстань між зондом і поверхнею досліджуваного середовища, чужорідний прошарок між досліджуваною поверхнею та зондовим пристроєм.

У п'ятому розділі запропоновано метод синхронного визначення вмісту корисних компонентів в залізорудному масиві, що реалізується розробкою комбінованого свердловинного пристрою, в єдиному корпусі якого поєднана апаратура селективного гамма-гамма та магнітометричного каналів. Це дозволяє одночасно отримувати достовірну інформацію про вміст заліза загального і магнетитового уздовж одного сектора циліндричної поверхні свердловини. Завдяки аналізу ідентичних об'єктів гірничої маси за двома параметрами, досягається синергетичний ефект виявлення ознак факторів, що впливають на точність вимірювань.

Досліджено взаємозв'язок вмісту заліза загального та магнетитового для руд другого залізного горизонту родовища Велика Глеюватка, та встановлено тісний кореляційний зв'язок цих параметрів.

Обґрунтовано та розроблено функціональну схему пристрою, на основі якої було виготовлено прототип комбінованого свердловинного пристрою. Для зменшення впливу обводненості свердловини на вимірювання гамма-гамма методом було запропоновано та обґрунтовано метод використання масштабних коефіцієнтів та встановленого кореляційного зв'язку заліза загального та магнетитового. Розроблено алгоритм аналізу та корегування даних синхронного методу, який визначає обводнені інтервали свердловини та уточнює в них результати контролю вмісту заліза загального.

Промислові випробування запропонованих методів оперативного контролю вмісту заліза загального в обводнених свердловинах довели підвищення точності вимірювань в 3,5 рази, до рівня $\pm 2,4 \%$.

Ключові слова. Вміст заліза магнітного, вміст заліза загального, селективний гамма-гамма метод, індуктивний метод, комбінований свердловинний пристрій., оперативний контроль.

SUMMARY

Hrytsenko A.M. Improvement of methods and means of determining the content of useful components in the iron ore massif. - On the rights of the manuscript.

PhD thesis for the degree of candidate of technical sciences in the study program 05.11.13 - Instruments and methods for monitoring and determining the substances composition. - National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», MES of Ukraine, Kiev, 2021.

PhD thesis devoted to the development and improvement of methods and means of synchronous determination of total iron and magnetite iron content in the iron ore massif.

The dissertation main scientific task is to establish change regularities in the intensity of scattered gamma radiation by rock, depending on its mechanical and physicochemical properties, the borehole surface state, as well as the rocks magnetic susceptibility dependence on iron content associated with magnetite, for iron content operative control in iron ore raw materials on the operating bore wall.

The research idea is to simultaneously use the interaction results of magnetic and radiation fields with rocks and, depending on their physicochemical properties, to determine the iron content.

The research objective is to solve an urgent scientific problem, which is to improve methods and means of increasing the accuracy of instruments for

determining useful components (total iron and magnetite) content in iron ore by synchronous use of radiation and electromagnetic fields with rocks massifs and factors interfere.

To achieve this objective, the following tasks are defined:

1. Carry out critical analysis of literature sources and structural analysis of operational control known developments of useful components content in iron ore;
2. Choose and justify the optimal method for determining magnetite iron, develop a model of the instrument that makes it and conduct testing;
3. Choose and justify the determining total iron method, develop the instrument model for its achieving, develop a mathematical model for measuring zone geometry optimization;
4. Conduct a laboratory tests set to determine the factors influencing the measurements accuracy, and provide impact degree estimating of each of them;
5. Develop synchronous determination methods and means of useful components content in boreholes and conduct stability research of their functioning in laboratory and industrial conditions.

The measurements accuracy increasing idea is achieved by using two sensors that make the selective gamma-gamma method and magnetometric, the placing of which provides identical objects measurement, and the measured parameters reliable correlation presence allows detecting and deleting some factors influence.

The research object – the interaction process of electromagnetic fields and ionizing radiation in the rock massif to determine iron ore useful components content.

The research subject – methods and means of determining the content of total iron and associated with magnetite in explosive boreholes for useful component content operational control in the rocks natural deposit.

Research methods. To solve the tasks, a comprehensive research method is used, which includes theoretical and instrumental methods: planning experiments, mathematical processing of their results; analysis of physicochemical composition of ores depending on variations of technological factors, theoretical generalizations

using the interaction theory of gamma radiation and electromagnetic fields with rocks, methods of mathematical, simulation and computer modeling, experimental research in laboratory and industrial conditions. Theories of mining, electrical engineering, radiometry, algorithm and control are used in the research; methods of numerical and statistical analysis are used for processing and generalization of the received data.

The obtained results innovative nature:

1. Synchronous method for determining the quality characteristics of iron ore to increase the operational control accuracy of total iron and magnetite in explosive boreholes based on the synergistic composition of the integrated flux of scattered low-energy gamma radiation and magnetic susceptibility is firstly justified and developed.
2. To reduce the borehole water content impact on the measuring total iron content accuracy, a method based on the use of scale factors and the correlation between total iron and magnetite iron was justified and developed.
3. Selective gamma-gamma method for determining the total iron content in the raw material by optimizing the geometric parameters of the measuring zone that reduces the borehole wall surface irregularities influence on accuracy has been further developed.

The obtained results practical value:

1. Instrument model for measuring the magnetic susceptibility of rocks based on an autogenerator magnetometric transducer was developed, which allowed to determine magnetite iron content in Kryvyi Rih basin iron ore samples with an error not exceeding 0,81 % abs.;
2. The feasibility of using the isotope Am-241 as ionizing radiation source for selective gamma-gamma method, which allows to determine the total iron content in Kryvyi Rih basin ores with an error not exceeding 0,78 % abs.;
3. Combined borehole instrument was developed to determine iron ore material composition quality characteristics, which contains selective gamma-

gamma in a single body, and magnetometric links, the structural placing of which ensures identical test objects introduction in their measuring zone;

4. Combined borehole instrument integration into the mobile station «Carrer-Kryvbas» was done and the modernization allowed to obtain on the station operator screen synchronously quantitative values of total iron and magnetite iron distribution along the borehole depth instantly, at the measurement time, without additional costs data processing;

5. Combined borehole instrument as a mobile station «Carrer-Kryvbas» part is introduced on the ore mine geophysics lot of the state enterprise «UKRCHORMETGEOLOGIJA» and the quarry of mining and processing complex «Ukrmekhanobr» OJSC «Mariupol Metallurgical Plant named after Illyich».

The introduction justifies thesis choice, problem urgency, formulates research objective and tasks, defines the object, subject and idea of research, and formulates scientific innovative nature and main theoretical and practical results of the dissertation, applicant personal contribution, and data on research approbation and publication, research structure.

The first section considers the indicators control current state of useful components content in iron ore raw materials, at its extraction in an open way. The systems analysis and control methods is carried out, their disadvantages are defined; the ores non-destructive quality control methods advantages are generalized.

The magnetometric method is considered, which is based on the use of rocks magnetic susceptibility value dependence (χ) on the magnetite amount in them (Fe_{magn}). It is determined that for magnetite quartzite deposits vast majority, including the Kryvyi Rih basin, the distinctive feature is the dependence $\chi = f(Fe_{magn})$ with high reliability of approximation ($r = 0.85 \dots 0.95$), which is a favorable and fundamental prerequisite for magnetite iron content quantitative determination.

Along with the need to test iron ores for magnetic iron, in the mining process there is ores operational quality control problem for total iron. For this purpose, in the 60s of the twentieth century, a gamma-gamma method was proposed in a selective version, which is based on measuring the effects of low-energy gamma quanta interaction ($E \leq 300$ keV) with substance. The total iron content determination is based on the presence of close correlation between useful component mass fraction, rock density and scattered gamma radiation intensity.

Critical analysis of methods and instruments for determining useful components content in the iron ore mass showed that the magnetometric method is the most suitable for determining magnetite iron content, and gamma-gamma method in a selective version to determine total iron content.

The second section discusses magnetometric method features for determining magnetite iron content, and the most appropriate and possible for use in an explosive borehole – inductive. This method is based on changing the electric measuring coil inductance when making a ferromagnetic material with some magnetic susceptibility in the alternating electromagnetic field generated by this coil.

To register rocks magnetic susceptibility in their deposit natural conditions, a functional diagram was developed and autogenerator magnetometric transducer model (MT) was made. With this installation help, the magnetite iron content index dependence on the magnetic susceptibility was determined.

The fourth section discusses the factors that influence accuracy of measuring the useful component content. Using the gamma-gamma method has a significant impact on factors related to changes in physical and chemical properties of the studied substances, as well as geometric measurement conditions variability, i.e.: elemental composition of rocks and ores, their humidity, distance between probe and surface of the investigated medium, foreign layer between the test surface and the probe instrument.

The fifth section proposes method of synchronous determination of useful components content in the iron ore massif, which is realized by combined borehole

instrument development, in single body which combines the equipment of selective gamma-gamma and magnetometric links. This allows to simultaneously obtaining reliable information about total iron and magnetite content along one sector of borehole cylindrical surface. By analyzing identical rock mass objects on two parameters, a synergistic effect is achieved by detecting factors features that influence the measurements accuracy.

The relationship between the total and magnetite iron content for ores of the second iron horizon of the Velyka Hleyuvatka deposit was studied, and a close correlation between these parameters was determined.

The instrument block diagram is justified and developed, on the basis of which the combined borehole instrument prototype was made.

To reduce the borehole water content influence on the gamma-gamma measurement, the method of using scale factors and the determined correlation between total iron and magnetite was proposed and justified. An algorithm for analysis and correction of data of synchronous method was developed, which determines the borehole flooded intervals and specifies the total iron content control results.

Operational control proposed methods industrial tests of total iron content in flooded boreholes have increased the measurements accuracy by 3,5 times, to the level of $\pm 2,4 \%$.

Keywords. Magnetic iron content, total iron content, selective gamma-gamma method, inductive method, combined downhole device.

Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертаційної роботи:

1. Гриценко А.Н. Методы синхронного каротажа сухих и обводненных скважин / А.А. Азарян, А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького технічного університету». - 2011 - № 27. – с. 258-262. *Здобувачем науково обґрунтовано ідею використання запропонованих методів, розробка алгоритму роботи, аналіз та узагальнення переваг запропонованих методів;*

2. Гриценко А.Н. Сравнительный анализ законов распределения железа связанного с магнетитом / А.Н. Гриценко // Журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность». – 2012 - №2. - с. 74-75;

3. Гриценко А.Н. Мобильная станция для каротажа взрывных скважин / А.А. Азарян, А.Н. Гриценко // «Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління». – 2011 – №4 – с. 52-55. *Здобувачем розроблено функціональну схему мобільної станції та принцип її роботи;*

4. Гриценко А.Н. Информационно-измерительная Система оперативного использования данных каротажа / А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2012 – №31 – с. 218-220;

5. Гриценко А.Н. Планирование горных работ с использованием информации о каротаже взрывных скважин / А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2013 – №34 – с. 32-34;

6. A. Gritsenko Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction / A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, D. Shvets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkiv, 2018 – №5/5(95)2018. –р. 13-19. (Входить до МНБ Scopus). *Здобувачем розроблено функціональну схему, виконані дослідження;*

7. A. Gritsenko Using the intensity of absorber gamma radiation to control the content of iron in ore / A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, V. Serebrenikov, D. Svets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkiv, 2019 – №3/5(99)2019. –р. 29-35. (Входить до МНБ Scopus). *Здобувачем виконані математичні розрахунки, отримано кореляційні залежності;*

8. Гриценко А.Н. Разработка измерительного канала для оперативного контроля содержания железа магнитного во взрывных скважинах / А.А. Азарян, А.А. Трачук, А.Н. Гриценко, Д.В. Швец // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2019 -№1 – с. 138-145. *Здобувачем розроблено функціональну схему вимірювального каналу;*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Гриценко А.Н. Методика обработки данных по каротажу / А.В. Швыдкий, А.В. Черкасов, А.Н. Гриценко // Материалы международного симпозиума «Качество минерального сырья», КТУ, 18–23 июня 2012 г., м. Ялта.–Кривой Рог . – 2011 – с. 216-221. *Здобувачем запропоновано ідею, виконано розрахунки, проведено промислові дослідження, узагальнено висновки;*

10. Гриценко А.Н. Использование информационно-вычислительных систем для каротажа скважин / А.Н. Гриценко // «Інформаційні управляючі системи та технології», Одеса 08-10 жовтня 2013 р.: Матеріали міжнародної наук.-практ. конф. Одеса – 2013 – с. 63-65;

11. Гриценко А.Н. Исследование и учет влияния воздушного зазора между датчиком и горной породой на точность определения содержания железа общего гамма-гамма методом / А.Н. Гриценко, В.В. Дрыга // Сьомий міжнародний симпозіум «Качество минерального сырья», Кривий Ріг – 09-11 вересня 2015 р : Матеріали симпозіуму Кривий Ріг – 2014 – с. 238-247 *Здобувачем запропоновано ідею, виконано лабораторні дослідження та математична обробка їх результатів, сформульовано висновки;*

12. Гриценко А.Н. Интегральный поток интенсивности рассеянного гамма-излучения как функция от параметров геометрии измерения / А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.Н. Гриценко, А.А. Трачук // Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference «Modern Scientific Achievements and Their Practical Application» (October 31, 2017, Dubai, UAE). сб. тр. №11(27), Vol.1, November 2017. – С. 18–24. *Здобувачем виконані дослідження запропонованої ідеї, та побудова кореляційних залежностей результатів дослідження;*

13. Gritsenko A. Research of opportunities for increasing control accuracy of femag content in blastholes// A. Azaryan, A. Trachuk, D. Shvets, A. Gritsenko// 14-th international conference «Science and society»: Hamilton, Canada, 20 september 2019 // Materials conference Hamilton – 2019 - pp. 4-9. *Здобувачем розроблено функціональну схему.*

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

14. Гриценко А.Н. Оперативный контроль и управление качеством при добыче и переработке минерального сырья / А.А. Азарян, В.А. Азарян, В.В. Дрига та ін.. –ОКТАН PRINT, Прага:2020 -500 с. *Здобувачем виконано: аналіз і класифікація факторів, що впливають на вибір метода контролю, систематизація фізико-технічних і технологічних факторів що впливають на точність, дослідження оптимізації гамма-гамма методу контролю, розробка та оптимізація магнітометричного методу контролю;*

15. Гриценко А.Н. Информационное обеспечение автоматизированной системы контроля качества при добыче железорудного сырья в условиях карьеров / А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.Н. Гриценко и др. // Науковий журнал «Інженерія програмного забезпечення». – 2012 – №2(10) – с. 17-25. *Здобувачем розроблено алгоритми роботи системи;*

16. Гриценко А.Н. Исследование взаимосвязи показаний ручного и комбинированного каротажного зонда при каротаже буровзрывных скважин / А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2015 – №40 – с. 73-77;

17. Гриценко А.Н. Исследование экспресс-анализа содержания общего железа в руде с использованием гамма-излучения / А.А. Азарян, А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2016 – №43 – с. 79-84. *Здобувачем проведено лабораторні дослідження та виконано математичну обробку їх результатів, побудовано кореляційні залежності;*

18. Gritsenko A.N. Model gamma radiation in the interaction with rock formation / A.A. Azaryan, A.N. Gritsenko, A.A. Trachuk та ін. // International Journal of Robotics and Automation. – 2019 - Vol.8, No.4 – pp. 269-276 (Закордонне видання). *Здобувачем розроблено методику побудови моделі та інтерпретації результатів моделювання;*

19. Пат. №74623 Україна, G01V 5/00. Пристрій оперативного контролю вмісту корисного компонента в мінеральній сировині / [А.А. Азарян, А.М. Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник, Г.М. Лісовий та ін.]; заявл.16.03.12; опубл. 12.11.12; Бюл. №21. *(Здобувачем удосконалено функціональну схему);*

20. Пат. №85059 Україна, G01V 5/00. Пристрій для каротажу свердловин / [А.М. Гриценко] ; заявл.26.04.13; опубл. 11.11.13; Бюл. №21;

21. Пат. №118167 Україна, G01V 5/04. Пристрій синхронного гамма-гамма-каротажу з електронним інклінометром / [А.А. Азарян, А.М. Гриценко, Д.Ю. Мірошник, С.В. Пилипенко, Ю.Є. Цибулевський та ін.]; заявл.13.02.17; опубл. 25.07.17; Бюл. №14. *(Здобувачем удосконалено функціональну схему);*

22. Пат. №119777 Україна, G01V 5/00. Пристрій оперативного контролю вмісту корисного компонента у мінеральній сировині / [А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.М. Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник та ін.]; заявл. 05.04.17; опубл. 10.10.17; Бюл. №19.*(Здобувачем розроблено алгоритм роботи пристрою);*

23. Пат. №121880 Україна, G01V 3/28. Пристрій для магнітного каротажу геофізичних свердловин / [А.А. Азарян, В.А. Азарян,

А.М. Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник та ін.]; заявл.07.04.17; опубл. 26.12.2017; Бюл. №24. *(Здобувачем удосконалено функціональну схему);*

24. Пат. №123234 Україна, G01V 5/12. Сверхдлинный прибор для селективного гамма-гамма каротажа / [А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.М. Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник та ін.]; заявл.05.04.17; опубл. 26.02.2018; Бюл. №4. *(Здобувачем удосконалено функціональну схему).*

ЗМІСТ

ЗМІСТ	19
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1 Аналіз методів та засобів Контролю Якості залізорудної сировини	31
1.1. Сучасний стан питання контролю якості залізорудної сировини	31
1.2 Аналіз існуючих методів та засобів	33
1.3 Класифікація існуючих методів і засобів контролю якості мінеральної сировини	36
1.4. Коротка геолого-мінералогічна характеристика залізистих кварцитів стосовно до неруйнівних методів контролю	40
Висновки по розділу	46
РОЗДІЛ 2 Дослідження, методів та засобів оперативного визначення вмісту заліза магнетитового	48
2.1 Дослідження, вибір і обґрунтування методів контролю вмісту магнітної складової у залізистих кварцитах.....	48
2.2 Розробка функціональної схеми індуктивного методу контролю магнітної сприйнятливості	50
2.3 Реалізація функціональної схеми автогенераторного магнітометричного датчика. Розробка принципової схеми.....	55
2.4 Апробація автогенераторного магнітометричного перетворювача в лабораторних умовах	59
2.5 Конструкція магнітного датчика	63
Висновки по розділу	65
РОЗДІЛ 3 Дослідження, методів та засобів оперативного визначення вмісту заліза загального.....	67
3.1 Фізичні процеси взаємодії гамма-квантів з речовиною	67
3.2 Фізичні основи методів розсіяного гамма-випромінювання	73
3.3 Методи та засоби реєстрації іонізуючого випромінювання	74

3.4 Методи розрахунку поширення гамма - квантів при використанні гамма - гамма методу.	81
3.5 Обґрунтування конструкції свердловинних пристроїв і визначення оптимальних умов вимірювань гамма-гамма методу.	82
3.6 Математична модель оптимізації параметрів геометрії вимірювання розсіяного гамма-випромінювання	85
3.7 Апробація селективного гамма-гамма методу на зразках руд Криворізького басейну.....	95
Висновки по розділу	100
РОЗДІЛ 4 Дослідження чинників, що впливають на точність визначення вмісту корисного компонента в залізорудній сировині	102
4.1 Узагальнення чинників	102
4.2 Дослідження впливу речовинного складу гірських порід на інтенсивність інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання.....	102
4.3 Дослідження залежності інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання від атомного номеру хімічного елементу	107
4.4 Дослідження впливу щільності, пористості і текстури гірських порід на точність визначення вмісту заліза загального в свердловинах	113
4.5 Дослідження впливу «повітряного зазору» між робочою поверхнею зондового пристрою і досліджуваною поверхнею на інтенсивність інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання.....	115
4.6 Дослідження впливу вологості гірської породи	117
Висновки по розділу	119
РОЗДІЛ 5 Розробка методів та засобів синхронного визначення якості залізорудної сировини	121
5.1 Узагальнена ідея розробки комбінованого пристрою контролю якості залізорудної сировини	121
5.2 Дослідження залежності заліза загального від вмісту заліза магнетитового	123

5.3. Розробка методів синхронного каротажу сухих і обводнених свердловинах	132
5.4. Розробка алгоритму роботи комбінованого свердловинного пристрою	136
5.5 Основні технічні вимоги до комбінованого свердловинного пристрою	138
5.6 Розробка апаратної частини.....	139
5.7 Програмне забезпечення	150
5.8 Налаштування комбінованого свердловинного пристрою	152
5.9 Лабораторні випробовування свердловинного пристрою	156
5.10 Інтеграція комбінованого свердловинного пристрою до складу мобільної каротажної станції.....	158
5.11 Промислові випробовування мобільної станції.....	163
Висновки по розділу	175
Висновки по роботі	177
Список використаних джерел.....	179
Додаток А Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	189
Додаток Б Результати хімічного аналізу проб руди ПАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат»	196
Додаток В Програмне забезпечення комбінованого свердловинного пристрою	201
Додаток Г Карта реєстрів комбінованого свердловинного пристрою	211
Додаток Д Діаграми промислових випробовувань комбінованого свердловинного пристрою	214
Додаток Е Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	225

Список умовних позначень і скорочень

АРП – автоматичний регулятор підсилення.

ВК – вимірювальна котушка;

ГГМС – гамма-гамма метод селективний;

ГЗК - гірничо-збагачувальний комбінат;

ЗЗ – зворотний зв'язок;

ІП – індуктивний перетворювач;

МП – магнітометричний перетворювач;

НЧ – низькочастотний;

ОП – операційний підсилювач;

ПАТ – публічне акціонерне товариство;

РВМС – рудниковий вимірювач магнітної сприйнятливості;

ФЕП – фотоелектронний помножувач;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

ЯМР – ядерно-магнітний резонанс.

ВСТУП

Актуальність теми. Гірничо-металургійний комплекс України є важливою галуззю економіки, він забезпечує майже п'яту частину внутрішнього валового продукту та значні валютні надходження. По світових запасах залізної руди Україна займає перше місце, а по виробництву залізорудної продукції – сьоме місце у світі. Аналіз конкурентоспроможності гірничо-збагачувальних комбінатів доводить, що для збереження України серед основних гравців на міжнародному ринку, необхідно, насамперед, забезпечити високу якість як залізорудної сировини, так і кінцевої продукції – концентрату.

Оперативний контроль вмісту масової долі заліза загального і пов'язаного з магнетитом в розвідувальних і вибухових свердловинах на гірничо-збагачувальних комбінатах України є одним з важливих етапів технологічного процесу видобутку і переробки залізорудної сировини. Наявність своєчасної і достовірної інформації про фізико-хімічні властивості гірських порід при визначенні речовинного складу в експлуатаційних свердловинах на основі комплексної технології синхронного визначення речовинного складу з використанням взаємодії іонізуючого і електромагнітного випромінювання з гірською масою, забезпечує підвищення точності вимірювання, що дозволяє своєчасно планувати видобувні роботи, що в свою чергу підвищує якість видобутої руди та зменшує втрати корисного компонента, а отже зменшує собівартість залізорудної сировини.

Нині для визначення вмісту заліза в експлуатаційних свердловинах на залізо загальне і пов'язане з магнетитом застосовуються два різні свердловинні пристрої (зонди) з аналоговими реєстраторами, що знижує як точність, так і продуктивність процесу вимірювання. Вихідні дані з

аналогових реєстраторів потребують подальшої обробки кваліфікованим персоналом, що додатково займає час.

Аналіз існуючих методів і приладів неруйнівного контролю вмісту заліза в гірській речовині, пересіченого вибуховою свердловиною, доводить, що для розробки і впровадження приладів, недостатньо досліджені впливи ступеня обводненості свердловин, бурового шламу, і стану поверхні свердловини, фізико-хімічних і фізико-механічних властивостей гірських порід на точність приладів визначення речовинного складу гірських порід в їх природних умовах залягання. Перераховані проблеми актуальні для усіх залізородних гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) України, отже, вимагають подальших досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконана в Криворізькому національному університеті на кафедрі моделювання та програмного забезпечення, і відповідає цільовій програмі "Розробка методів і засобів оперативного контролю і управління якістю чорних, кольорових і нерудних корисних копалин на гірничовидобувних і гірничопереробних підприємствах України". Обраний науковий напрям забезпечувався виконанням наступних науково-дослідних робіт, в яких автор брав безпосередню участь: «Розроблення теорії векторного поля розсіяного гамма-випромінювання та перетворення хвиль Лява і Стоунлі в магнітному полі для керування якістю мінеральної сировини» (№ ДР 0109U002335); «Дослідження фізико-хімічних властивостей залізистих кварцитів і каротаж вибухових свердловин» (№ ДР 0110U004443); «Дослідження процесів перетворення гамма-випромінювання, ультразвукових об'ємних і поверхневих хвиль на межах гетерофазних середовищ для оптимізації збагачувальних технологій» (№ ДР 0112U000359); «Дослідження факторів, які впливають на каротаж вибухових свердловин» (№ ДР 0111U005573); «Розроблення методу визначення мінералого-технологічних різновидів залізної руди з використанням надвисокочастотного електромагнітного випромінювання,

гамма-випромінювання, та високоенергетичного ультразвуку» (№ ДР 0115U003030); «Дослідження впливу пульпи на результати каротажу вибухових свердловин в умовах ГЗК Кривбасу» (№ ДР 0112U003953). А також господарських договорів КНУ: «Дослідження фізико-хімічних властивостей залізистих кварцитів і каротаж вибухових свердловин» (№ 2-825-10); «Дослідження впливу обводненості на результат каротажу вибухових свердловин» (№ 26-945-13); «Дослідження основних і додаткових факторів, що впливають на точність каротажу вибухових свердловин» (№ 2-35-15); «Розробка функціональної, принципової схеми і комплексного алгоритму роботи інтелектуальних датчиків для оперативного контролю вмісту магнітного і загального заліза у підірваній, здрібненій та подрібненій гірничій масі» (№ 26-57-16).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є вирішення актуальної наукової задачі, що полягає в удосконаленні методів та засобів підвищення характеристик точності пристроїв визначення вмісту корисних компонентів (заліза загального та магнетитового) в залізорудній сировині шляхом синхронного використання результатів взаємодії радіаційних та електромагнітних полів з масивом гірських порід та врахування сторонніх факторів.

Для досягнення поставленої мети визначені основні завдання:

1. Виконати критичний аналіз літературних джерел та структурний аналіз відомих розробок оперативного контролю вмісту корисних компонентів в залізорудній сировині;
2. Вибрати та обґрунтувати оптимальний метод визначення заліза магнетитового, розробити макет пристрою, що його реалізує та провести апробацію;
3. Вибрати та обґрунтувати метод визначення заліза загального, розробити макет пристрою для його реалізації, розробити математичну модель для оптимізації геометрії зони вимірювання;
4. Провести комплекс лабораторних досліджень для визначення

факторів, що впливають на точність вимірів, і надати оцінку ступеню впливу кожного з них;

5. Розробити методи та засоби синхронного визначення вмісту корисних компонентів у свердловинах та провести дослідження стабільності їх функціонування в лабораторних та промислових умовах.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії електромагнітних полів та іонізуючого випромінювання з масивом гірських порід для визначення вмісту корисних компонентів залізорудної сировини.

Предмет дослідження – методи та засоби визначення вмісту заліза загального і пов'язаного з магнетитом в вибухових свердловинах для оперативного контролю вмісту корисного компонента в умовах природного залягання гірських порід.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань застосований комплексний метод досліджень, що включає в себе теоретичні й інструментальні методи: планування експериментів, математичну обробку їх результатів; аналіз фізико-хімічного складу руд в залежності від варіацій технологічних чинників, теоретичні узагальнення з використанням теоретичних основ взаємодії гамма-випромінювання та електромагнітних полів з гірськими породами, методи математичного, імітаційного та комп'ютерного моделювання, експериментальні дослідження в лабораторних і промислових умовах. У роботі використано теоретичні основи гірничої справи, електротехніки, радіометрії, алгоритмування та управління; для обробки та узагальнення отриманих даних застосовано методи чисельного і статистичного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Уперше обґрунтовано та розроблено синхронний метод визначення якісних характеристик залізорудної сировини для підвищення точності оперативного контролю вмісту заліза загального та магнетитового у вибухових свердловинах на основі синергетичної композиції інтегрального

поток розсіяного низько-енергетичного гамма-випромінювання та величини магнітної сприйнятливості гірських порід;

2. Для зменшення впливу обводненості свердловини на точність вимірювання вмісту заліза загального обґрунтовано та розроблено метод, що базується на використанні масштабних коефіцієнтів і кореляційної залежності між залізом загальним і залізом магнетитовим;

3. Набув подальшого розвитку селективний гамма-гамма метод визначення вмісту заліза загального в сировині завдяки оптимізації геометричних параметрів зони вимірювання, що зменшує вплив нерівностей поверхні стінки свердловини на точність.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати роботи отримані автором самостійно. Здобувач є автором наукової ідеї, теоретичних й експериментальних досліджень, включаючи теоретичні результати та наукові положення, що винесені на захист.

У роботах, виконаних у співавторстві автором виконано: [1] – аналіз і класифікація факторів, що впливають на вибір метода контролю якості залізорудної сировини, систематизація фізико-технічних і технологічних факторів що впливають на точність контролю якості, лабораторні дослідження оптимізації гамма-гамма методу визначення вмісту корисного компонента, розробка та оптимізація магнітометричного методу контролю якості; [2] – розроблено та обґрунтовано методи контролю якості в обводнених свердловинах, розроблено алгоритм роботи, узагальнено їх переваги та недоліки; [4] – розроблено функціональну схему мобільної станції та алгоритм її роботи; [7] – розроблено функціональну схему способу реєстрації іонізуючого випромінювання, та проведено лабораторні дослідження взаємодії гамма-випромінювання з залізорудною сировиною; [8] – розроблено математичне обґрунтування геометричних параметрів зони вимірювання гамма-гамма методу; [9] – розроблено функціональну схему індуктивного методу визначення вмісту заліза магнетитового; [10] – розроблено алгоритм роботи мобільної станції та її систему інформаційних

потоків; [12] – проведено лабораторні дослідження взаємодії гамма-випромінювання з залізорудною сировиною, виконано математичну обробку та узагальнення результатів; [13] – розроблено аналітичні вирази підвищення ефективності реєстрації результатів взаємодії гамма-випромінювання з гірською масою; [14], [16], [18], [19] – удосконалено функціональні схеми пристрів визначення вмісту корисних компонентів залізорудної сировини; [17] – розроблено алгоритм роботи пристрою контролю вмісту корисного компоненту; [20] – розроблено методику аналізу та відображення розподілу корисних компонентів по глибині свердловини; [22] – розроблено методику та проведені лабораторні дослідження впливу повітряного зазору на точність гамма-гамма методу, узагальнення результатів досліджень; [23] – досліджено вплив геометричних параметрів зони вимірювань на точність гамма-гамма методу; [24] – розроблено функціональну схему, та принцип роботи пристрою визначення магнітної сприйнятливості залізорудної сировини.

Автором розроблено програмне забезпечення приймання, обробки і відображення результатів вимірів у вигляді таблиць та діаграм, та збереження результатів на електронному носії. При безпосередній участі автора здійснювалася розробка, виготовлення, налагодження та випробування комбінованого свердловинного пристрою.

Апробація матеріалів роботи. Викладені у дисертаційній роботі результати досліджень доповідалися та обговорювалися на міжнародних та загальнодержавних науково-практичних конференціях: на VI міжнародному симпозіумі «Якість мінеральної сировини-2011» (м. Ялта 2011 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні управляючі системи та технології» (м. Одеса 2013 р.), VII міжнародному симпозіумі «Якість мінеральної сировини-2011» (м. Кривий Ріг 2014 р.), IV міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні наукові досягнення та їх практичне застосування» «Modern Scientific Achievements and Their Practical Application» (м. Дубай, 2017 р.), XIV міжнародній конференції «Наука і суспільство» «Science and society» (м. Гамільтон 2019 р.).

Проміжні результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та кафедри моделювання та програмного забезпечення Криворізького національного університету.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено макет пристрою для вимірювання магнітної сприйнятливості гірських порід на основі автогенераторного магнітометричного перетворювача, що дозволило визначати вміст заліза магнетитового в зразках залізної руди Криворізького басейну з похибкою, що не перевищує 1,3 % абс.;

2. Доведено доцільність використання в якості джерела іонізуючого випромінювання для селективного гамма-гамма методу ізотопу Am-241, що дозволяє визначити вміст заліза загального в рудах Криворізького басейну з похибкою, що не перевищує 1,5 % абс.;

3. Розроблено комбінований свердловинний пристрій для визначення якісних характеристик речовинного складу залізорудної сировини, який містить в єдиному корпусі селективний гамма-гамма, та магнітометричний канали, конструктивне розміщення яких забезпечує внесення в їх вимірювальну зону ідентичних досліджуваних об'єктів;

4. Виконана інтеграція комбінованого свердловинного пристрою в мобільну станцію «Кар'єр-Кривбас» та проведена модернізація дозволила отримувати на екрані оператора станції синхронно кількісні значення розподілу заліза загального та заліза магнетитового по глибині свердловини миттєво, в момент проведення вимірювань, без додаткових витрат часу на обробку даних;

5. Комбінований свердловинний пристрій в складі мобільної станції «Кар'єр-Кривбас» впроваджений на партії рудникової шахтної геофізики державного підприємства «Укрчорметгеологія» та кар'єрі гірничо-збагачувального комплексу «Укрмеханобр» ПрАТ «ММК ім. Ілліча».

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 24 наукові праці, у тому числі 1 монографія, 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у фахових виданнях України категорії «А») 6 патентів України на корисну модель, 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 4 публікації в інших виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 229 сторінок друкованого тексту, з них 155 сторінок основного тексту, містить 90 рисунків, 14 таблиць, список використаних джерел з 93 найменувань на 10 сторінках і 5 додатків на 40 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

1.1. Сучасний стан питання контролю якості залізорудної сировини

Як відомо, процес відпрацювання кожного родовища супроводжується комплексом геологорозвідувальних робіт, до складу яких входить побудова детальних геолого-технологічних планів і розрізів з обов'язковою оцінкою якості сировини в природному заляганні за вмістом у ньому корисних компонентів.

Експлуатація бідних, складних по мінеральному складу і важкозбагачуваних руд привела до ускладнення технологічних схем. Збільшилася кількість показників якості і властивостей руди, що впливають на збагачення і діапазон коливань через зниження бортового вмісту корисних компонентів в промислових рудах, а також підвищилися вимоги регламенту збагачення руд. На кожному родовищі, як правило, виділяється до п'яти-шести технологічних сортів руд, що відрізняються речовинним і мінералогічним складом, класом крупності, вкрапленням і іншими показниками [1].

Використання для цих цілей тільки традиційних геологічних методів випробування виключно трудомістким, вимагає великих витрат непродуктивного ручної праці, великих коштів на відбір, транспортування, механічну обробку і хімічні аналізи проб. При цьому не забезпечується необхідна точність і, що дуже важливо, оперативність одержуваних результатів. Це, в свою чергу, веде до суттєвих ускладнень в оперативному плануванні та порушує процес усереднення (шихтовки) вихідної рудної маси, що подається на збагачувальні фабрики. Ще з початку 60-х років в колишньому СРСР розпочалися науково-дослідні та конструкторські роботи

по використанню фізичних методів контролю та визначення якості вихідної руди в різних точках технологічного ланцюга.

Залізорудні родовища Криворізького басейну характеризуються високою мінливістю вмісту заліза, звивистістю контактів рудних тіл з наявністю безрудних ділянок, що висуває підвищені вимоги до організації та управління гірничими роботами. Виснаження запасів багатих руд і залучення в розробку ділянок родовищ зі складними гірничо-геологічними умовами призводить до зниження величини середнього вмісту заліза у вихідній руді внаслідок втрат і засмічення, що обумовлює збільшення обсягів збагачення сировини і зрештою викликає підвищення собівартості продукції.

У цих умовах ефективне управління гірничими роботами та процесами переробки руд ускладнене завдяки відсутності своєчасної та достовірної інформації про якісні параметри, що залучаються у видобуток і переробку руд.

На гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК) Криворізького басейну інформацію про якість сировини в процесі її видобутку продовжують отримувати, в основному, традиційним геологічним методом, який включає відбір проб, їх подрібнення, сушіння, помел, і хімічний аналіз, що робить цей метод випробовування є малопродуктивним, неоперативним і трудомістким.

Наявність достовірної та своєчасної інформації про якість залізорудної сировини на всіх етапах технологічного ланцюга дозволить знизити втрати і розубожування, підвищити вилучення заліза в концентрат, знизити витрати енергоносіїв і матеріальних ресурсів, що в кінцевому підсумку приведе до загального зниження собівартості продукції, і більш раціональному використанню природних ресурсів [2, 3].

В останні роки, виріс попит на апаратуру неруйнівного контролю в силу морального і фізичного зношення пристроїв, що випускались раніше, а більшість з них взагалі непридатні для використання. Підприємства, що випускали їх серійно, в силу певних причин припинили виготовлення, а деякі взагалі припинили своє існування.

1.2 Аналіз існуючих методів та засобів

Відомо безліч методів, що дозволяють реєструвати в аналоговій і цифровій формі електропровідність і магнітну сприйнятливість, щільність і параметр викликаної поляризації вздовж стовбура свердловини.

Поява нових пристроїв, заснованих на нових фізичних принципах, внесла кардинальні перетворення в аналіз гірських порід. Перший напрямок - елементний аналіз гірських порід на основі спектрометрії природного і наведеного гамма-випромінювання, урану, кремнію, кальцію, заліза, сірки, титану, алюмінію і магнію. Другий напрямок - використання мікро-електричного вимірювання для отримання фотографії стінки свердловини. Це дуже цінний апарат для аналізу складу, текстури та структури порід, корисний при визначенні фракцій і умов залягання порід. Третій напрям - вимір фізичних параметрів в процесі буріння [4].

Прикладом використання явища ядерного магнітного резонансу (ЯМР) є пристрій [5], який виконано за стандартною схемою з виносним датчиком-зондом, що опускається в свердловину, і заснований на спостереженні змін часів поздовжньої і поперечної релаксації. ЯМР-метод можна віднести до високочастотних методам контролю. Його істотними недоліками є висока складність вимірювань і апаратури, велика чутливість до промислових перешкод, вплив анізотропії.

До пристроїв, що працюють на середніх і високих частотах, можна віднести розробки компанії Sperry Sun - пристрої, що працюють на частотах 10, 20, 40 кГц. Пристрій EWR-3D працює на частоті 2 МГц, має виносний датчик, що складається з 3-х випромінювачів і 4-х приймачів. Ведуться розробки пристроїв, що працюють на частотах від 200 МГц до 1.1 ГГц. В цьому випадку глибинність вимірювань змінюється в межах 2.5 ... 15 см. Вертикальна роздільна здатність становить близько 2.5 см [5].

Телефотометрія (ТФМ) і свердловинне акустичне телебачення (САТ) є новими геофізичними методами, використовуваними для вивчення

геологічного розрізу уздовж свердловини. Принцип дії полягає в тому, що акустичний промінь (для САТ) або промінь видимого світла (для ТФМ) сканує стінку свердловини по щільної спіралі під час руху датчика вгору. Результат - панорамне зображення стінки свердловини. Обробка даних панорамних зображень стінок свердловин дозволяє розраховувати просторове положення структурних елементів – тріщин і пластів. Поряд з унікальними можливостями застосування слід зазначити ряд недоліків: висока собівартість, великий час сканування, неможливість застосування у свердловинах, виконаних методом канатно-ударного буріння.

Пристрої електричного вимірювання (каротажу) призначені для вивчення геологічних розрізів свердловин по електричному опору. Цей метод включає наявність електричних полів на стінках уздовж осі свердловини із заданою силою струму. Вимірювання виконуються на різних значеннях потенціалів, додатковий вимір потенціалу електричного поля в точці вимірювання різниці потенціалів і вимірювання параметрів профілювання.

Теоретична основа магнітометричного методу базується на використанні залежності величини магнітної сприйнятливості (χ) гірських порід і руд від кількості в них магнетиту, що всебічно доведено багатьма дослідженнями (Кудрявцев Ю.І., Мейер В.А., Шульгін В.С., Попов А.А., Барінов Е.А., Глухих І.І., Тихонов Б.К., Тимофєєв Є.В. та ін.). Відмінною рисою стало те, що залежність $\chi = f(Fe_{mag})$ характеризується високими величинами коефіцієнтів кореляції ($r = 0.85 \dots 0.95$) для переважної більшості родовищ магнетитових кварцитів, в тому числі Криворізького басейну, що є сприятливою і основоположною передумовою для кількісних визначень заліза магнетитового в рудах і породах.

Апаратура РВМС-1 (рудниковий вимірювач магнітної сприйнятливості) працює за принципом екрануючого впливу магнітної середовища на вимірювальні перетворювачі. Пристрій містить у собі індуктивний датчик, який при вимірюваннях опускають в свердловину. Завдяки великій довжині свердловинного снаряда є можливість інтегрування

значень магнетиту по довжині свердловини, при цьому магнітний потік досить глибоко проникає в досліджувану породу. Однак великі габарити свердловинного пристрою не дозволяють визначити місце точного залягання залізовмісних пластів. До недоліків даного пристрою слід віднести його великі габарити [6].

З початку 70-х років інститутом ВІРГ під керівництвом Тимофєєва О.В. проводилися інтенсивні роботи по розробці станції «Кар'єр-1», призначеної для вимірювання в вибухових шарошкових свердловинах в залізорудних кар'єрах. У магнітному каналі цієї станції використана двокотушкова система вимірювань зі збільшеним розміром зонда до 1.0 м, що забезпечує глибинність дослідження стінок 0.5 м.

Поряд з необхідністю випробування залізних руд по залізу магнітному, в процесі видобутку існує проблема оперативного контролю якості руд по залізу загальному. Для цієї мети ще в 60х роках був запропонований гамма-гамма метод в селективному варіанті, заснований на вимірюванні ефектів взаємодії гамма-квантів низької енергії ($E \leq 300$ кеВ) з речовиною. При цьому джерелами низьких енергій (Co-57, Se-75, Am-241 та ін.), опромінюється контрольована гірська маса і за допомогою спеціальних рудникових радіометрів, реєструється розсіяна середовищем частина гамма-випромінювання N_p . Величина цієї частини N_p залежить від перерозподілу супроводжуваних один одного ефектів - фотоелектричного поглинання і комптонівського розсіювання.

Значний внесок в теоретичні і експериментальні дослідження даного фізичного процесу стосовно до проблеми оперативного контролю та управління якістю руд чорних металів внесли вчені Філіппов Є.М., Очкур А.П., Леман Е.П., Пшеничний Г.А., Большаков А.Ю., Азарян А.А., Пак Ю.М., Старчик Л.П. та ін.

Гама-гамма метод застосований в пристроях ПАКС, які використовуються на підприємствах Кривого Рогу з 1995р. і добре зарекомендували себе для визначення вмісту заліза загального в

свердловинах. Дані прилади розроблені в Криворізькому технічному університеті (нині Криворізькому національному університеті), виготовлені АТЗТ «ТЕТРА» м. Жовті Води. та ТОВ «Рудпромгеофізика» м. Кривий Ріг [7-9].

1.3 Класифікація існуючих методів і засобів контролю якості мінеральної сировини

При видобутку мінеральної сировини контроль якості в масиві може здійснюватися рентгенорадіометричним і гамма-гамма метричним методами, як найбільш забезпеченими апаратурою та методиками в даний час, нейтронно-активаційний, нейтрон-нейтронних і нейтронно-гамма методи, як більш точні, чутливі з достатньою глибинністю. Фізична суть перерахованих методів наведена в табл. 1.1. Можливості кожного з них різні, в залежності від типу руд і елементів, що визначаються. Наприклад, за допомогою рентгенорадіометричного методу визначають свинець, цинк, олово, вольфрам, молібден, титан, цирконій та інші елементи [1-16]; гамма-гамма методом - марганець, хром, свинець, сурму, залізо, нікель; нейтронним методом - ртуть, сурму, нікель; гамма-нейтронним методом - берилій та інші [17-19].

Короткі характеристики, фізичні принципи, можливості і області застосування основних методів контролю якості вмісту корисного компонента наведені в табл. 1.1, яка складена за даними [20, 21] і класифікована автором.

Таблиця 1.1

Класифікація та короткі характеристики методів контролю якості

Група методів і властивість, що використовується	Метод і його сутність	Характерні фізичні процеси	Область застосування (руда, корисні копалини)
1	2	3	4
Ядерно-фізичні методи			
I група Природна радіоактивність	1. <i>Гамма-метод</i> . Різниця в інтенсивності гамма компонентів	Спонтанний розпад ядер природно радіоактивних елементів, що супроводжуються альфа-, бета- і гамма-випромінюванням.	Уран, торій і елементи, що асоціюються з ними і мають тісний кореляційний зв'язок
	2. <i>Бета-метод</i> . Відмінності в інтенсивності бета-випромінювання, компонентів, що визначають		
II група Штучна або наведена радіоактивність	1. <i>Фотонейтронний</i> (гамма-нейтронний). Відмінності в інтенсивності штучного нейтронного випромінювання компонентів, що виокремлюються.	Порогова, фотонейтронна реакція (γ, n), яка відбувається при опроміненні потоком гамма-квантів.	Берилій, літій, олово, ртуть, вольфрам, уран, залізо та ін.
	2. <i>Нейтронно-активаційний</i> . Різниця в інтенсивності радіоактивних випромінювань ізотопів виокремлюваних компонентів	Утворення і подальший розпад ізотопів, що супроводжуються радіоактивними випромінюваннями.	Уран, фтор, алюміній, мідь, марганець, літій, вугілля та ін.
III група Поглинання радіоактивних випромінювань	1. <i>Гамма (рентгено)-абсорбційний</i> . Відмінність в ослабленні гамма- та рентгенівського випромінювання виокремлюваними компонентами	Комптонівське розсіювання і фотоелектричне поглинання гамма-випромінювання поблизу межі К-стрибка поглинання.	Вугілля, горючі сланці, ртуть, вольфрам, свинець, сурма, олово, барій, залізо, марганець
	2. <i>Нейтронно-абсорбційний</i> . Відмінності в ослабленні виокремлюваними компонентами нейтронного випромінювання джерел	Сповільнення, розсіювання і захоплення нейтронів ядрами елементів.	Бор, залізо, барій, літій, ртуть

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4
	<i>3. Метод, заснований на реєстрації розсіяного гамма-випромінювання</i> Відмінність в комптонівського розсіяння гамма-променів різними компонентами	Залежність інтенсивності розсіяного первинного гамма-випромінювання від ефективного атомного номера речовини	Залізо, хром, марганець, свинець, вольфрам, ртуть, і ін. важкі елементи
	<i>4. Ядерно-резонансний. Ефект Мессбауера</i>	Ядерно-резонансне поглинання і розсіяння гамма-квантів відповідного джерела випромінювання	Олово
<u>IV група</u> Характеристичне рентгенівське випромінювання	<i>Флуоресцентний рентгенорадіометричний</i> Відмінність в енергіях характеристичного випромінювання поділюваних компонентів	Збудження характеристичного рентгенівського випромінювання атомів елементів. Джерела збуджуючого випромінювання: радіоактивні ізотопи, рентгенівські трубки	Елементи з атомним номером більше 20
Оптичні методи			
<u>V група</u> Випромінювання оптичної області спектру	<i>1. Фотометричний.</i> Відмінності в відбивній здатності і інших оптико-фізичних властивостях компонентів, що розділяються	Взаємодія світлового випромінювання з речовиною	Доломіт, польовий шпат, кварц, барит, вапняки, гіпс, тальк, кам'яна сіль, смарагди, магнезит, та ін.
	<i>2. Люмінесцентний.</i> Відмінності в люмінесценції виокремлюваних компонентів	Люмінесценція мінералів, порушується ультрафіолетовими, рентгенівськими та іншими енергетичними впливами	Алмазовмісні, флюоритові, шеєлітові і ін.
Радіохвильові методи			
<u>VI група</u> Випромінювання радіохвильової області спектра	<i>Радіохвильовий.</i> Відмінності в поглинанні електронно-магнітної енергії зміни індуктивної складової контуру генератора	Взаємодія радіохвильового випромінювання з речовинами	Вугілля, золото, залізо та ін..

Сутність кожної групи методів визначає їх особливості та сферу застосування.

Перша група. Використовується для визначення зольності вугілля по щільності потоку зворотного бета-випромінювання. Метод є найбільш вивченим. Роботи по визначенню зольності вугілля по природній радіоактивності не вийшли за межі лабораторних досліджень.

Друга група. Використовується для визначення вмісту різних хімічних елементів із застосуванням швидких нейтронів з енергією до 14 MeV, одержуваних за допомогою нейтронних джерел і генераторів. Розроблені основні положення технології фотонейтронний випробування берилієвих руд і створена відповідна апаратура. У промисловому масштабі фотонейтронний сепарація берилієвих руд застосовувалась в колишньому СРСР з 1966 року. Розробка конкретних питань застосування нейтронно-активаційного методу дозволила визначити можливість експрес-аналізу марганцевих, боросилікатних руд.

Третя група методів є найбільш поширеними, засновані на поглинанні випромінювання і застосовуються для визначення вмісту корисного компонента в чорних, кольорових, поліметалічних рудах і для контролю зольності вугілля [23-32]. Методи особливо ефективні, коли контрольована гірська маса є бінарним або ж квазібінарним середовищем.

Четверта група. Цій групі методів присвячено найбільшу кількість публікацій. Розробці методики визначення умов випробування міді, свинцю і розробці аналізаторів присвячені роботи [31-33]. Цей метод знайшов застосування як для аналізу підготовлених проб [33], так і для визначення вмісту корисних компонентів у природному заляганні [32].

Аналіз науково-технічної літератури показує, що з усіх існуючих ядерно-фізичних методів найбільш часто для контролю якості мінеральної сировини застосовуються рентгенорадіометричні методи (~37 %), гамма-гамма (~ 26 %), нейтронні (35 % та інші методи (~2 %) від проаналізованого

об'єму даних. Так, на Зиряновському (Казахстан), Іртишському (Казахстан), Алмаликському (Узбекистан), Текелійському (Казахстан) і інших поліметалічних підприємствах використаний гамма-гамма методу для контролю якості руд і уточнення морфології рудних тіл в експлуатаційних і вибухових свердловинах забезпечило по ряду блоків зниження втрат металу в надрах на 1 ... 5 % та збільшення показників якості на 3 ... 7 %. Оперативний контроль якості дозволяє коригувати видобувні роботи і виключити з гірської маси багато тисяч тон пустої породи. Аналогічні роботи виконуються на сур'мяно-ртутних, міднорудних і при розробці Печенгських родовищ мідно-нікелевих руд (Росія) [34].

На Качканарському ГЗК (Росія) впроваджено автоматизовану систему контролю якості. Система включає каротаж і випробування свердловин пристроями РВМС-2, АМК-1200, Кар'єр-1(2) [35].

1.4. Коротка геолого-мінералогічна характеристика залізистих кварцитів стосовно до неруйнівних методів контролю

Залізистий кварцит – (інші поширені назви-джеспіліт, ітабірит, таконіт) - метаморфічна порода хемогенно-осадового походження з характерною тонкослоїстою будовою. Це найпоширеніший в природі «учасник» залізисто-кременистих формацій. Залізисті кварцити включають в себе наступні мінерали: кварц; магнетит; мартит; гематит; біотит; хлорит; піроксен; амфібол та інші. Присутність в породі інших мінералів може визначатися складом первинного осаду, а також глибиною процесів метаморфізації.

Родовища залізистих кварцитів зазвичай приурочені до щитів і платформ докембрійського періоду. Процес формування даної гірської породи відбувався приблизно 2,5-3 млрд років тому. Для порівняння: вік нашої планети оцінюється вченими в 4,5 мільярда років. Основні властивості породи: залізисті кварцити відрізняються наступним набором фізичних і

механічних характеристик: твердість - 7 балів за шкалою Мооса; колір породи-червонувато-бурий, темний, іноді – сірий або червоно-сірий. Щільність залізистих кварцитів - 3240-4290 кг/м³. Міцність на стискання - від 180 до 370-400 МПа (в залежності від вмісту в породі силікатів). Вогнетривкість - до +1770 °С. Структура породи - дрібнозерниста або кристалічно-зерниста. Текстура породи-шарувата, тонкосмугаста.

Джеспіліти можуть залягати пластами різної потужності в товщах древніх порід метаморфічного походження. Нерідко вони поєднуються зі слюдами, амфіболітами, сланцями або гнейсами. Як правило, залізисті кварцити-це продукт метаморфізації вулканогенно-осадових порід, значно збагачених оксидами заліза. Найбагатші поклади залізистих кварцитів зосереджені на Кольському півострові, в Криворіжжі (Україна), на Далекому Сході, півночі Казахстану, в районі Верхнього озера (США), а також в межах Курської магнітної аномалії. Найбільшими запасами цього мінерального ресурсу володіють такі держави: Росія; Україна; США; Австралія; Індія; Казахстан; ПАР; Ліберія; Гвінея; Китай.

У петрології виділяють джеспіліти: широкосмугові (понад 10 міліметрів). Середньосмугові (3-10 мм). Тонкосмугові (до 3 мм). Хімічний склад того чи іншого зразка визначається вмістом силікатних і рудних мінералів, а також ступенем кристалізації породи. Однак характерною особливістю всіх залізистих кварцитів є той факт, що речовини SiO₂, FeO і Fe₂O₃ в сумі складають до 90 % від загальної маси породи. Решта ж компоненти присутні в незначних пропорціях (не більше 1-2 %). Варто відзначити, що найдавніші на Землі залізисті кварцити виявлені на острові Гренландія, в районі Ісуа. Їх вік оцінюється геологами в 3760 мільйонів років.

Для залізистих кварцитів будь-якого складу характерні тонкозерниста будова (десяті і соті частки мм) і шаруваті текстури, обумовлені чергуванням рудних, нерудних і змішаних шарів субпаралельного орієнтування. По

ширині шару виділяються тонко (менше 2 мм) -, середньо(2-5 мм) -, широко (5-20 мм) -, грубо (більше 20 мм) - і різносмугасті текстури.

Магнетитові кварцити є відносно більш грубозернистими. Магнетит утворює як окремі зерна розміром 0,03-0,05 мм, так і крупнозернисто-вкраплені агрегати до 0,2 мм і суцільні рудні слойки. Ступінь агрегації магнетиту досягає 60-80 %. У магнетитових кварцитах близько 50 % становить клас з крупністю зерна магнетиту 0,1-0,2 мм і 11 % дрібні зерна (0,03-0,05 мм).

На рис. 1.1 наведено загальний вигляд залізистих кварцитів.



Рис. 1.1 Загальний вигляд різновиду залізистих кварцитів
1- Магнетит; 2- Кварц.

Головними мінералами залізистих кварцитів є магнетит (до 45 %) і кварц (близько 33 %). У невеликих кількостях (менше 10 %) присутні лужні амфіболи, доломіт, егірін, актиноліт і тальк.

Залізисті кварцити широко використовуються в чорній металургії як сировина для виробництва сталі, чавуну та деяких інших продуктів.

Для вибору раціональної схеми рудопідготовки необхідно детальне вивчення вихідної мінеральної сировини, її мінералогічного складу, фізико-хімічних і фізико-механічних властивостей.

Вибір оптимальної схеми рудопідготовки вимагає детального і ретельного аналізу всіх особливостей руд. Досвід показує, що економічно і

технологічно вигідніше рудну шихту готувати до процесу подрібнення-збагачення, тому що більше 60 % енергетичних витрат припадає на подрібнення.

Нижче наведена таблиця 1.2 фізико-хімічних і фізико-механічних властивостей залізистих кварцитів.

Таблиця 1.2

Фізико-хімічні і фізико-механічні властивості залізистих кварцитів

Fe _{заг.} , %	Fe _{маг.} , %	Щільніст, кг/м ³	Магнітна сприйнятл. χ , од. СІ	Міц- ність, МПа	Структура	Текстура
38,5	26,3	3240-4290 кг/м ³	Магнетит 8,8-25, Гематит (1,3-13)*10 ⁻³	370-400	Мілкозер- ниста, кристалічно- зерниста	слоїста, тонкопо- лосчата

З таблиці 1.2 видно, що магнітна сприйнятливість магнетитових кварцитів становить від 8,8-25 од. СІ, що створює хорошу інформаційну базу для розробки, виготовлення і впровадження в гірничорудне виробництво неруйнівних методів оперативного контролю якості залізорудної сировини при видобутку і переробці.

Залізисті смугасті породи докембрію залізисті кварцити в даний час у світовій гірничодобувній промисловості є найбільш важливим промисловим типом руд.

За провідним рудним мінералом виділяються кварцити чотирьох типів: магнетитові, гематитові, лімонітові і сидеритові. У цій роботі розглядаються магнетитові (неокислені) залізисті кварцити як основний і єдиний тип руд, що експлуатується ГЗК України. Крім того, для розробки методів і засобів оперативного контролю якості залізорудної сировини при відкритому видобутку важливо знати ступінь окиснення залізистих кварцитів в залежності від їх фізико-хімічних і фізико-механічних властивостей. З цією метою були досліджені характерні особливості залізистих кварцитів Первомайського, Аннівського родовищ ВАТ «Північний ГЗК» і родовища Велика Глеюватка ВАТ «Центральний ГЗК».

Для залізистих кварцитів характерні такі ознаки:

- зміна вмісту заліза загального від 25 до 45 %, незначний вміст шкідливих домішок (сірка, фосфор);
- хімічний склад залізистих кварцитів змінюється в зворотній кореляційній залежності між вмістом заліза загального і кремнезему; відрізняється закономірним зменшенням вмісту SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO силікати містять різновиди від контактів з підстилаючими і покриваючими сланцями до магнетитових і гематит-магнетитових різновидів основної товщі пласта (залізистого горизонту) і відповідно збільшенням абсолютного вмісту заліза загального від 25 до 40 % і більше в гематит-магнетитових і магнетитових кварцитах;
- зміни вмісту заліза загального і пов'язаного з магнетитом (тобто заліза, пов'язаного з мінералом - магнетит) в межах окремих родовищ пов'язані зі зміною співвідношень між різними текстурно-мінералогічними різновидами кварцитів. Більш рівномірно змінюється вміст заліза загального і пов'язаного з магнетитом в магнетитових кварцитах, гематит-магнетитових різновидах кварцитів, найменш однорідні силікатові кварцити;
- мінливість вмісту заліза загального і пов'язаного з магнетитом кварцитів всіх родовищ підпорядковується закону нормального розподілу, що полегшує їх зіставлення;
- характерно рівномірний розподіл заліза загального (розчинного) по простягання і в хрест простягання рудних покладів і вельми нерівномірний розподіл заліза, пов'язаного з різними мінералами (магнетитом, гематитом, гідроокислами, карбонатами, силікатами, сульфідами), як по окремих шарах залізистих кварцитів (рудним, змішаним, кварцовим, силікатним, карбонатним), так і в цілому по покладу (в залежності від різновиду руд);
- основним типом текстури (будови) кварцитів є шарувата, обумовлена перемежовуваністю шарів різного мінерального складу;
- вкрапленість магнетиту в основному дрібна, тонка;

- циклічність будови залізистих пластів (горизонтів) проявляється в чіткій мінералогічній зональності нахилу простягання: сланці, безрудні і малорудні магнетит-карбонат-силікатні кварцити, карбонат-силікат-магнетитові кварцити, магнетитові кварцити, гематит-магнетитові кварцити, магнетитові кварцити, карбонат-силікат-магнетитові кварцити, безрудні і малорудні магнетит-карбонат-силікатні кварцити, сланці. На окремих ділянках родовищ наведений розріз може мати різну будову і повноту.

Головні мінерали: магнетит, гематит, мартит, залізна слюдка, мінерали гідроокису заліза, залізовмісні силікати (хлорити, амфіболи, біотити), карбонати заліза і кальцію, кварц.

Розглядаючи хімічний склад залізистих кварцитів можна зробити висновок, що єдиним мінералом заліза, що представляє промислову цінність, при існуючих технологіях магнітного збагачення, є магнетит. Тому оконтурювання покладів корисної копалини в просторі проводиться за так званим бортовим вмістом заліза магнетитового. Бортівий вміст це вміст заліза в мінімальній пробі і в основному становить 16 % заліза, пов'язаного з магнетитом.

Магнетити експлуатованих родовищ України майже ідеальні і містять залізо від 71.5 до 72.36 % і мають незначні ізоморфні заміщення Fe^{+2} на Mn^{+2} , Mg і Fe^{+3} , що позитивно позначається на магнітних властивостях мінералу. Для Криворізьких природних магнетитів намагніченість насичення досягається в полях 1050...1200 Тс і лежить в межах 89...103 Тс, а для штучних магнетитів намагніченість насичення досягається в полях 1300...1500 ЕРС і визначається величиною 93...119 Тс.

Особливо необхідно розглянути явище окислення магнетитових залізистих кварцитів. Цей процес веде до погіршення якості корисної копалини аж до повного перетворення в некондиційну сировину. В ході окислення магнетитових кварцитів магнетит перетворюється в гематит (мартит Fe_2O_3) з втратою магнітних властивостей і далі в гідроксиди заліза.

Для технологічних цілей інститутом «Механобрчермет» запропонована методика оцінки ступеня окислення залізистих кварцитів та їх розділення [36]:

$$\text{а) } \frac{F_{\text{магн}}}{Fe_{\text{заг}}} < 0.3 - \text{ окислені кварцити;}$$

$$\text{б) } \frac{F_{\text{магн}}}{Fe_{\text{заг}}} = 0.3 \dots 0.6 - \text{ напівокисли;}$$

$$\text{в) } \frac{F_{\text{магн}}}{Fe_{\text{заг}}} > 0.6 - \text{ неокислені кварцити,}$$

де $Fe_{\text{магн}}$ – вміст заліза магнетитового;

$Fe_{\text{заг}}$ – вміст заліза загального.

Такі критерії більш точно відображають природу процесів окислення і відповідають технологічним вимогам [36].

Для гірничорудної промисловості України особливий інтерес представляють неокислені кварцити, оскільки в даний час є досить багато способів і засобів для їх збагачення.

Висновки по розділу

1. Для раціонального видобутку залізної руди в сучасних ринкових умовах недостатньо традиційних геологічних методів контролю, в силу великої витрати людської праці для їх проведення, часу проведення та малої інформативності. Актуальним питанням постає використання неруйнівних методів для оперативного контролю якості сировини в масиві по вибуховим свердловинам;

2. Критичний аналіз відомих методів та засобів показав, що найбільш застосовуваними для визначення вмісту корисних компонентів в залізорудній сировині підходять ядерно-фізичні та магнітометричні методи;

3. Класифікація методів контролю якості за їх теоретичними основами, можливостями та поширеністю використання дозволила визначити найбільш придатні методи для контролю якості залізорудної сировини в умовах вибухових свердловин;

4. Проведена характеристика залізорудної сировини в умовах її природного залягання. Визначено фізичні характеристики, що залежать від вмісту корисних компонентів.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ, МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОПЕРАТИВНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ЗАЛІЗА МАГНЕТИТОВОГО

2.1 Дослідження, вибір і обґрунтування методів контролю вмісту магнітної складової у залізистих кварцитах

Вміст заліза магнітного (магнетиту) в залізорудній сировині можна визначити за величиною її магнітної сприйнятливості. Це пояснюється тим, що магнітна сприйнятливість магнетиту в 80-100 разів більше мартиту (мінералу слабомагнітних залізних руд) і більш ніж на два порядків вище, ніж у інших мінералів, що входять до складу рудних зростків.

З огляду на те, що магнітна сприйнятливість магнетиту значно вище, інших мінералів, що входять до складу гірської породи [37], то магнетитову руду можна кваліфікувати як бінарну суміш, де корисний компонент - магнітний, інші складові – немагнітні. Отже, вміст заліза магнітного в рудах можна визначити за величиною магнітної сприйнятливості магнетиту, що входить до складу породи.

Для оперативного контролю магнітної сприйнятливості залізорудної сировини застосовують котушки, індуктивність яких залежить від маси феромагнітного матеріалу внесеного в поле котушки.

Вибір методу визначення вмісту заліза магнітного.

Для вимірювання магнітної сприйнятливості рудного матеріалу при використанні магнітометричного методу визначення вмісту магнетитового заліза ($Fe_{\text{магн.}}$), відомі такі методи: індуктивний, індукційний і пондеромоторний [37].

Індуктивний метод найбільш поширений. Метод заснований на зміні індуктивності L електричної вимірювальної котушки при внесенні феромагнітного матеріалу з деякою магнітною сприйнятливістю χ в змінне магнітне поле, створюване даною котушкою, або ж на зміну

взаємоіндуктивності M двох магнітопов'язаних котушок, якщо сердечником є досліджуваний феромагнітний матеріал [38] :

$$L = f(\chi).$$

З огляду на це, вимірювальну котушку (або пару котушок) можна розглядати як параметричний (потребує джерела живлення) індуктивний первинний вимірювальний перетворювач (ППП), вхідним сигналом якого є магнітна сприйнятливості речовини, а вихідним – індуктивність [37, 39, 40].

Індукційний метод визначення магнітної сприйнятливості залізорудної сировини заснований на явищі електромагнітної індукції. Суть його полягає в наступному. При русі частинок феромагнітного матеріалу певної крупності і з певною швидкістю в зазорі постійного магніту, на який намотана електрична котушка, за рахунок зміни довжини повітряного зазору змінюється величина напруженості магнітного поля H , що призводить до наведення ЕРС в котушці. Величина ЕРС залежить від магнітної сприйнятливості часток χ , співвідношення довжини зазору і крупності частинок d_q і від швидкості руху частинок u_q :

$$e = f(\chi, d_q, u_q).$$

Даний метод може бути застосований для контролю якості залізорудної сировини на конвеєрі за умови усунення впливу крупності частинок і при постійній швидкості, а також для контролю крупності і кількості матеріалу.

Пондеромоторний метод визначення магнітної сприйнятливості проб залізорудної сировини (метод Фарадея) заснований на вимірюванні сили тяжіння F , що діє на пробу, розміщену в постійному магнітному полі. При цьому величина сили пропорційна величині магнітної сприйнятливості:

$$F = k\chi.$$

Проте, для цього необхідна наявність великої напруженості магнітного поля з малим його градієнтом, інакше зі зміною χ змінюється картина поля, що призводить до похибки. Іншим рішенням є застосування форми магнітних полюсів з ізодинамічним полем в зазорі магніту [37].

Метод може бути застосований для контролю якості проб подрібненої залізної руди або для контролю якості пульпи в пульпопроводі. Однак слід зазначити, що засоби контролю мають підвищене енергоспоживання, і технічно складні.

В результаті аналізу розглянутих методів контролю магнітної сприйнятливості в рудному матеріалі автором обраний індуктивний метод, як найбільш точний, технічно простий і перспективний при створенні засобів контролю якості заліза пов'язаного з магнетитом в вибухових свердловинах.

2.2 Розробка функціональної схеми індуктивного методу контролю магнітної сприйнятливості

Для реєстрації магнітної сприйнятливості гірських порід в природних умовах їх залягання, була розроблена функціональна схема і виготовлений макет автогенераторного магнітометричного перетворювача (МП, реєстратора магнітної сприйнятливості).

Принцип дії МП заснований на вимірюванні індуктивності вимірювальної електричної котушки (індуктивного перетворювача (ІП)), в змінне магнітне поле якої вноситься досліджувана гірська порода) за допомогою автогенератора, частота (період) коливань якого залежить від індуктивності.

При розробці автогенераторного МП встановлено, що для його побудови найбільш раціонально використовувати операційний підсилювач (ОП), в колі зворотного зв'язку (ЗЗ) якого встановлені фазозсувні або резонансні елементи: міст Вина, подвійний Т-подібний міст, фазозсувний RC-ланцюг, коливальні контури [41].

В таких схемах частота коливань визначається виключно параметрами цих елементів (і, відповідно, стабільність частоти - їх температурної і часової стабільності) і практично не залежить від інших факторів, таких як зміна

напруги живлення, коефіцієнта підсилення ОП і інших його параметрів (якщо умови роботи ОП такі, що його можна розглядати як ідеальний ОП). Таким чином, автогенератори на ОП відрізняються стабільністю параметрів, універсальністю, простотою і надійністю.

За основу обрана схема автогенератора з мостом Віна [42] (рис. 2.1). В ланцюг позитивного ЗЗ підсилювача коливань на ОП включений частотозадаючий ланцюг (елементи R , C), що представляє собою смуговий фільтр, що пропускає певну частоту гармонійного сигналу з ослабленням його амплітуди в 3 рази. Тому для виникнення коливань і зростання їх амплітуди до необхідного рівня коефіцієнт підсилення підсилювача коливань повинен бути більше 3 ($R_2 > 2R_1$), для підтримки амплітуди коливань на постійному рівні (режим сталих коливань) - точно 3 ($R_2 = 2R_1$), а при $R_2 < 2R_1$ коливання будуть згасаючими. Очевидно, що для стійкої роботи наведеної схеми на практиці необхідно додатково використовувати схему стабілізації амплітуди вихідної напруги.

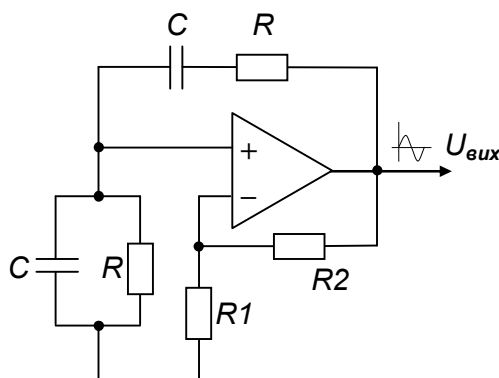


Рис. 2.1 Схема автогенератора на ОП з мостом Віна

В результаті аналізу варіантів побудови автогенераторних схем [42-45] обрано наступний загальний принцип побудови автогенераторного МП (рис. 2.2). МП являє собою автогенератор гармонійних коливань на ОП, позитивний ЗЗ якого утворений частотозадаючим послідовним коливальним rLC -контуром з індуктивним ППП і струмозадаючим резистором R_{cs} і, зі схемою АРП, який виконує інерційну стабілізацію амплітуди струму через контур і індуктивний ППП.

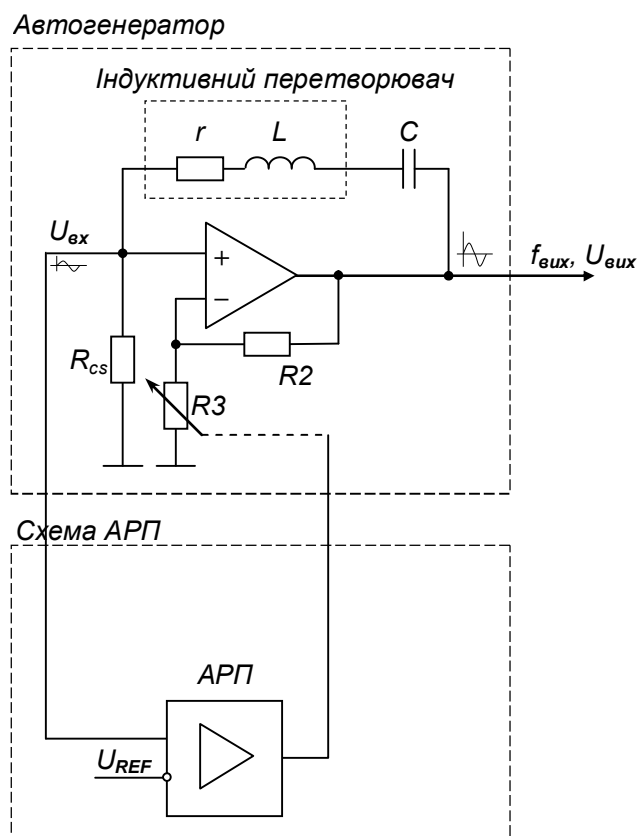


Рис. 2.2 Функціональна схема автогенераторного МП з інерційною стабілізацією амплітуди струму через ІП

Частота коливань автогенератора f визначається індуктивністю котушки L і ємністю конденсатора контуру C за виразом:

$$f = \frac{2\pi}{\sqrt{LC}}.$$

Ефективна магнітна сприйнятливість S_x досліджуваної гірської маси визначається по співвідношенню величин частоти коливань на виході МП в повітрі (f_0) і з гірничою масою (f_1):

$$S_x = \frac{(f_0)^2 - (f_1)^2}{(f_1)^2} = \left(\frac{f_0}{f_1} \right)^2 - 1. \quad (2.1)$$

В зв'язку з низькою чутливістю використовуваних накладних індуктивних ІПП і малою величиною магнітної сприйнятливості досліджуваних магнетитових руд, частота коливань на виході МП змінюється дуже незначно. Так, при піднесенні залізної руди з вмістом заліза магнетитового (близько 20%) в магнітне поле котушки, період коливань

збільшується всього на кілька відсотків (близько 10^{-2} відносних). Це накладає певні вимоги до вимірювання періоду коливань з відносною похибкою не гірше $10^{-4} \dots 10^{-5}$.

Генератор синусоїдального сигналу (рис. 2.3), побудований на базі операційного підсилювача (ОП), в ланцюг позитивного зворотного зв'язку якого включений послідовний RLC коливальний контур, що складається з вимірювальної котушки (БК) L і конденсатора контуру C .

На функціональній схемі позначені: r_0 - внутрішній активний опір котушки, $R_{\text{вн}}$ - внесений активний опір втрат в матеріалі проби (що обумовлений втратами на перемагнічування і вихрові струми в матеріалі), $R_2 = R_{\text{вн}} + r_0$ - повний активний опір коливального контуру.

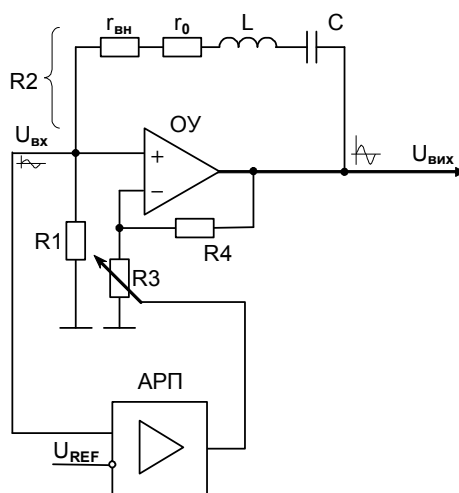


Рис. 2.3 Функціональна схема генератора датчика

Схема генератора забезпечує генерацію синусоїдальної напруги з частотою, рівній власній резонансній частоті коливального контуру:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Обрана схема саме з послідовним коливальним контуром, тому що його власна резонансна частота, на відміну від паралельного коливального контуру, не залежить від величини активного опору, включеного послідовно з вимірювальною котушкою, а визначається виключно величинами L і C .

В даній схемі включення ОУ умовою генерації сталої синусоїдальної напруги є рівність відносних опорів в ланцюгах позитивної та негативного ЗЗ:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

Для виконання цієї умови і автоматичної підтримки амплітуди вхідної напруги ОП на заданому рівні призначена схема автоматичного регулювання підсилення (надалі - АРП), що складається з детектора, інтегратора, джерела опорної напруги, підсилювача помилки і регулюючого елемента R_3 в ланцюзі негативного ЗЗ, в якості якого використовується опторезисторна пара або польовий транзистор.

Слід зазначити доцільність стабілізації саме вхідної напруги ОП, тому що при цьому стабілізуються амплітуда струму і напруженість магнітного поля вимірювальної котушки:

$$I_0 = \frac{U_{0_ex}}{R_1} = \frac{U_{REF}}{R_1} = const, H_0 = const.$$

Розглянемо роботу схеми АРП. Припустимо, що внаслідок збільшення внесеного опору втрат $R_{вн}$ амплітудне значення вхідної напруги U_{0_ex} стало нижче опорного U_{REF} . Це спричинить зменшення вихідної напруги схеми АРП, зменшення опору регулюючого елемента R_3 (польового транзистора), зменшення глибини негативного ЗЗ, збільшення коефіцієнта підсилення схеми більше одиниці і зростання амплітуди коливань до величини опорного U_{REF} . Точність регулювання забезпечується високим коефіцієнтом ($\geq 10^5$) підсилювача помилки в схемі АРП.

Застосування схеми АРП для стабілізації струму через вимірювальну котушку дозволило усунути вплив зміни внутрішнього опору котушки r_0 і опору втрат $R_{вн}$ вимірювального матеріалу на струм в котушці, що значно знижує вплив температури на похибку датчика [39].

2.3 Реалізація функціональної схеми автогенераторного магнітометричного датчика. Розробка принципової схеми.

Принципова схема магнітометричного датчика наведена на рис. 2.4.

Умовно схему можна розділити на три частини, зверху вниз:

- 1) перетворювача напруги живлення + 5В, - 5В і LC -фільтри;
- 2) генератора синусоїдальних коливань (RLC -генератор);
- 3) схеми АРП;
- 4) формувача прямокутного (частотного) сигналу.

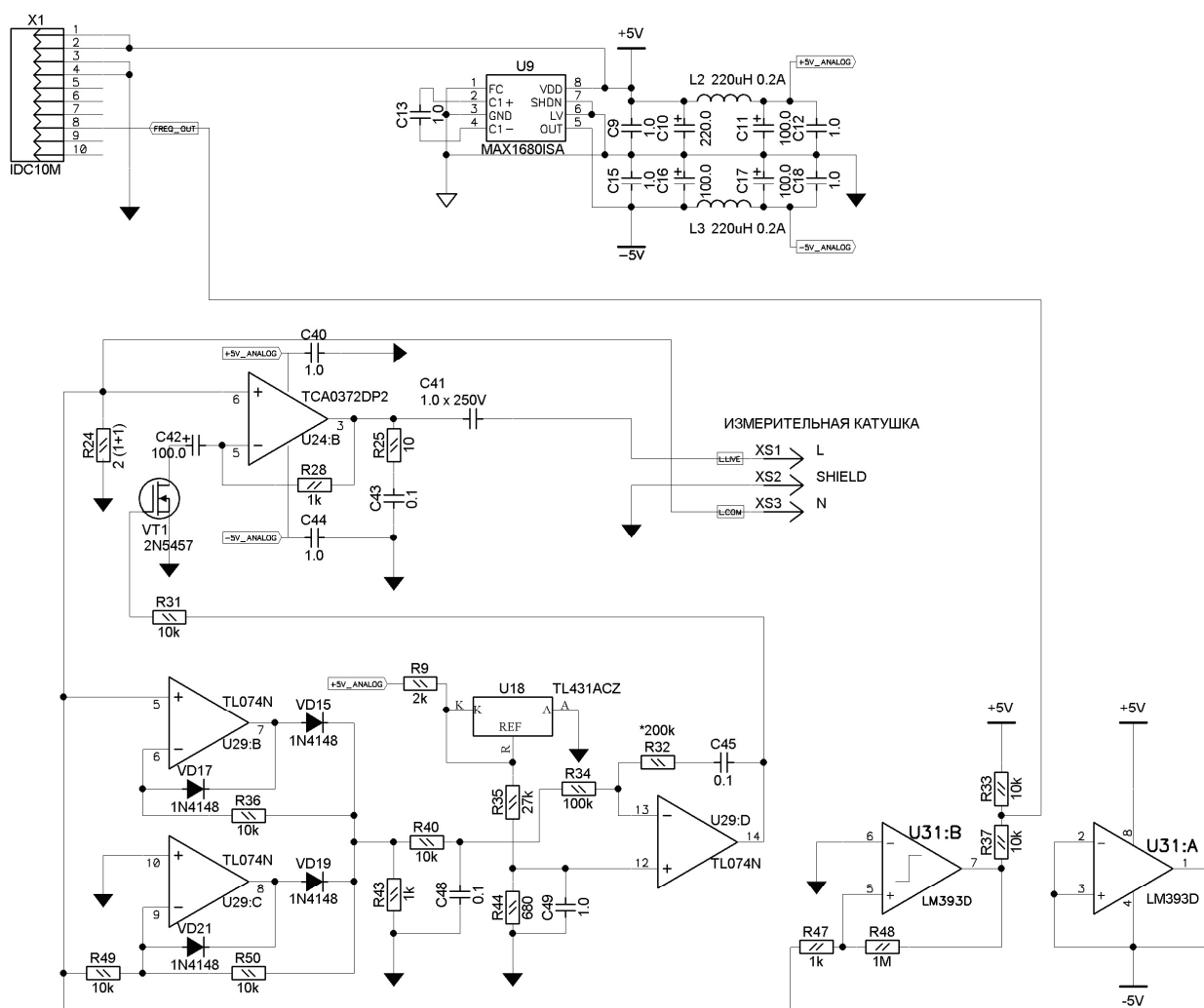


Рис. 2.4 Електрична принципова схема магнітометричного датчика

RLC -генератор. В якості ОП в генераторі використана мікросхема TCA0372DP2. Даний ОП забезпечує вихідний струм до 1А.

Ланцюг позитивного ЗЗ схеми ОП утворений послідовним коливальним контуром, що складається з вимірювальної котушки L і конденсатора $C41$, і струмовимірювального резистора $R24$. В якості $C41$ застосовується високовольтний конденсатор з малим температурним коефіцієнтом ємності (ТКЕ) і малими втратами на частотах до 1 кГц. Початкова робоча частота генератора встановлюється підбором конденсатора $C41$ і в середньому становить 0,8 ... 1,4 кГц. Ланцюг негативного ЗЗ утворений резистором $R6$ і опором каналу стік-витік польового транзистора (ПТ) $VT1$.

Схема АРУ призначена для підтримки на постійному рівні амплітуди напруги на струмовимірювальному резисторі $R24$ і, тим самим, і амплітуди струму через коливальний контур $L1C41$ шляхом регулювання глибини негативного ЗЗ ОП генератора. Схема складається з *прецизійного випрямляча* на двох ОП $U29:B$, $U29:C$, *фільтра*, що згладжує НЧ $R40C48$, *інтегруючого підсилювача помилки* на ОП $U29:D$ і *регулюючого елемента* - ПТ $VT1$.

Прецизійний випрямляч призначений для випрямлення синусоїдальної напруги і складається з повторювача-детектора позитивної напівхвилі на ОП $U29:B$ і інвертора-детектора негативної напівхвилі вхідного сигналу - на ОП $U29:C$. Випрямлена пульсуюча напруга з подвоєною робочою частотою виділяється на навантажувальному резисторі $R43$, опір якого вибрано на порядок менше, ніж опір $R40$ в фільтрі НЧ.

Фільтр НЧ $R40C48$ призначений для згладжування пульсацій випрямленої напруги. Вибір постійної часу фільтра визначається середнім періодом коливань T робочої частоти генератора і в даному випадку становить 1 мс.

Інтегруючий підсилювач помилки на ОП $U29:D$ призначений для порівняння середньовипрямленого значення вхідного сигналу з опорною напругою (620мВ), отриманого за допомогою дільника $R35R44$. ОП включений за інвертуючою схемою.

Постійна часу регулювання всієї схеми АРП визначається параметрами постійної часу фільтра НЧ $R32C45$, включеного до складу підсилювача помилки, і дорівнює 47мс, що значно більше, ніж середній період коливань генератора (1мс). Це забезпечує плавність регулювання, захист від можливих імпульсних перешкод, що діють на вхід схеми АРП і виключає вплив вихідного сигналу АРП форму і частоту синусоїдальної напруги генератора. Фільтр $R34R32C45$ побудований за типом "випередження - відставання". Демпферний резистор $R32$ призначений для забезпечення запасу по фазі схеми АРП на частоті, при якій загальний коефіцієнт передачі петлі АРП наближається до одиниці. Співвідношення $R32/R34$ визначає ступінь демпфірування, тобто відсутність перевантаження при стрибкоподібній зміні амплітуди вхідного сигналу схеми АРП. При збільшенні $R32/R34$ стійкість схеми АРП збільшується, але збільшується і її вплив на вихідний сигнал генератора, при зменшенні - навпаки. Вилучення резистора $R32$ призводить до самозбудження схеми АРП на інфранизких частотах порядку 10 Гц. Для наведеної схеми АРП відношення $R32/R34$ рекомендується вибирати в межах від 0.2 до 1.

Регулюючим елементом схеми АРП є польовий транзистор (ПТ) $VT1$. Даний ПТ працює як регульований опір в петлі негативного ЗЗ генератора. Для того щоб опір каналу стік-витік ПТ при позитивній та негативній напівхвилях сигналу відрізнялося незначною мірою, амплітуда напруги на струмовимірювальному резисторі $R24$ і входах ОП обрана досить малою (0.1В), для цієї ж мети служить розв'язуючий конденсатор $C1$. В іншому випадку виникає асиметрія вихідного сигналу генератора.

При сталому режимі роботи генератора напруга на затворі ПТ становить близько 2В. При зменшенні негативної напруги на затворі до нуля опір каналу стік-витік ПТ зменшується приблизно до 100 Ом, а при збільшенні до 4В - стає нескінченно великим (настає режим відсічення).

Важливим є те, що при подачі живлення в початковий момент напруга на затворі ПТ дорівнює нулю, опір каналу малий в порівнянні з опором

резистора R_{28} , тобто коефіцієнт підсилення ОП генератора становить не менше 100 (відношення R_{28} до опору каналу ПТ), що забезпечує надійний запуск генератора.

Амплітудне значення струму через LC -контур визначається за формулою:

$$I_0 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_{REF} \cdot R_{44}}{(R_{44} + R_{35})R_1}$$

Формувач прямокутного сигналу призначений для перетворення синусоїдальної напруги генератора в сигнал прямокутної форми для подачі на цифровий вхід мікроконтролера для їх подальшої реєстрації. Пристрій для формування побудований на компараторі LM393 і являє собою детектор переходу через нуль.

Для захисту від помилкового спрацьовування компаратора призначені резистори R_{51} , R_{48} , що утворюють ланцюг позитивного ЗЗ, який забезпечує невеликий гістерезис перемикання компаратора, рівний 5мВ. Це становить 1/20 від амплітуди вхідного сигналу (0.1В).

Вихід компаратора являє собою відкритий колектор n-p-n транзистора. Резистори R_{37} , R_{33} є одночасно навантаженням колектора і дільником напруги для отримання вихідного сигналу рівня TTL (0 або 5В).

На основі розробленої принципової схеми, приведеної на рис. 2.4 виготовлено макетну плату магнітометричного перетворювача, загальний вигляд якої приведено на рис. 2.5.

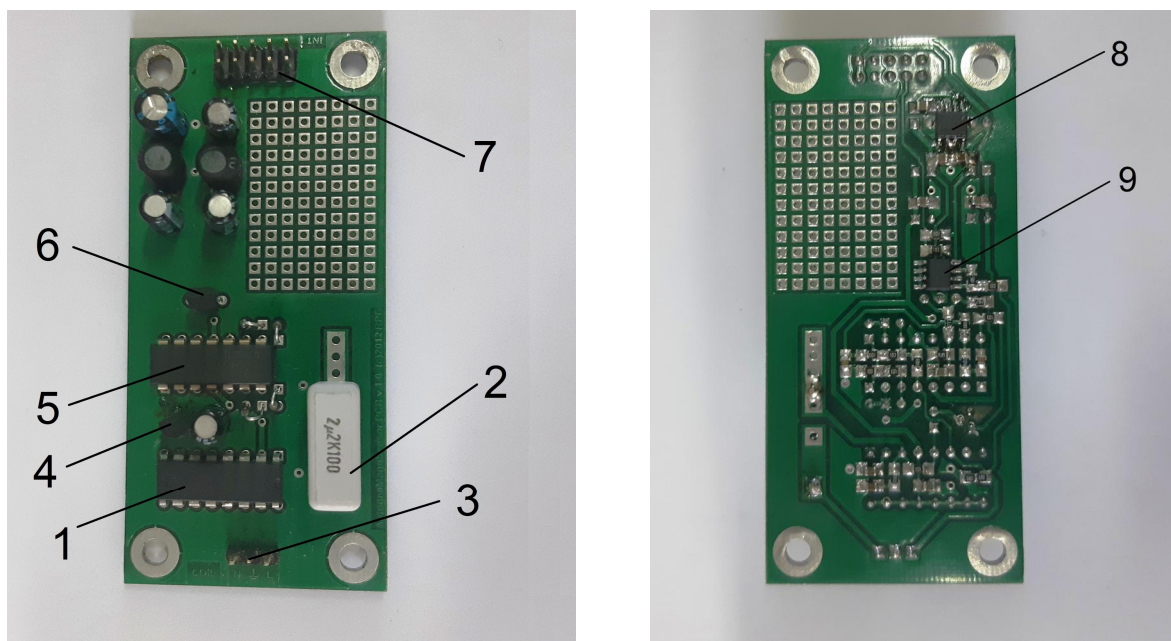


Рис. 2.5 Зовнішній вигляд електронної плати магнітометричного перетворювача

1 – операційний підсилювач ТСА0372DP2; 2 – високовольний конденсатор з малим температурним коефіцієнтом ємності; 3 – роз’єм вимірювальної котушки; 4 – польовий транзистор 2N5457; 5 – операційний підсилювач TL074N; 6 – джерело опорної напруги TL431ACZ; 7 - роз’єм джерела живлення та виходу частотного сигналу; 8 – перетворювач вхідної напруги в ± 5 В; 9 - операційний підсилювач LM393D

2.4 Апробація автогенераторного магнітометричного перетворювача в лабораторних умовах

Дослідження МП полягає в вимірі ефективної магнітної сприйнятливості, і побудови залежності вимірюваної величини з вмістом магнетитового заліза, визначеного в лабораторії хімічним способом.

Лабораторна установка (рис. 2.6) для визначення ефективної магнітної сприйнятливості складається з соленоїда, діаметром 180 мм і висотою 230 мм (дріт намотаний в один шар виток до витка), електронної плати автогенераторного МП, блоку живлення, цифрового осцилографа, ввімкненого в режимі вимірювання частоти (функціональна схема

установки приведена на рис. 2.7) і електронних ваг, з точністю вимірювання 0,1 г.

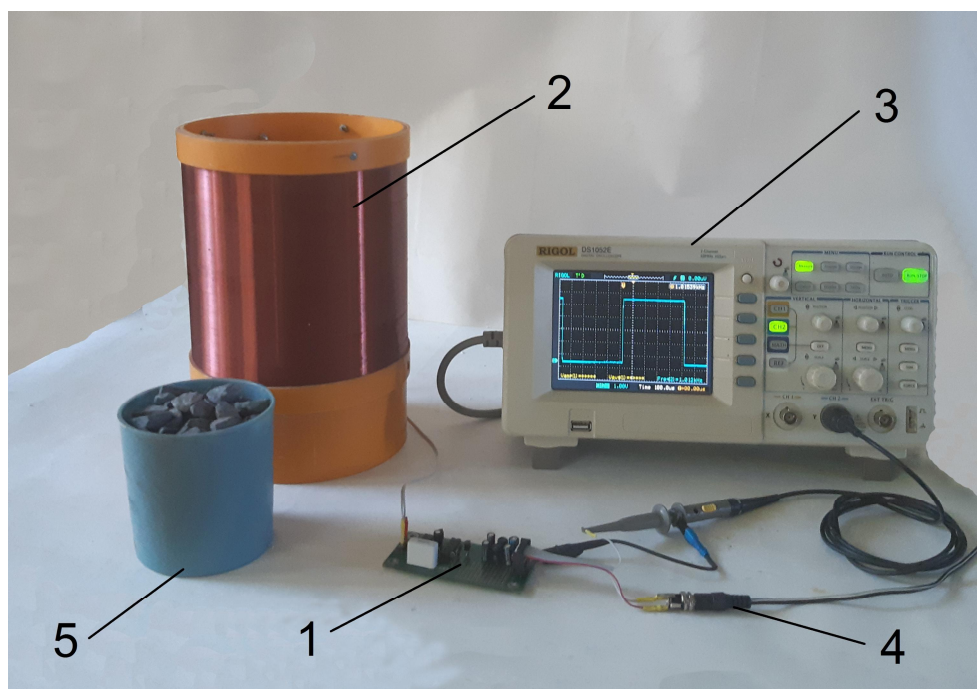


Рис. 2.6 Загальний вигляд лабораторної установки визначення магнітної сприйнятливості залізної руди на основі авто генераторного магнітометричного перетворювача

1- Електронна плата авто генераторного магнітометричного перетворювача; 2 - соленоїд; 3 – цифровий осцилограф; 4 – роз’єм блока живлення; 5 – залізна руда в циліндричній ємності.

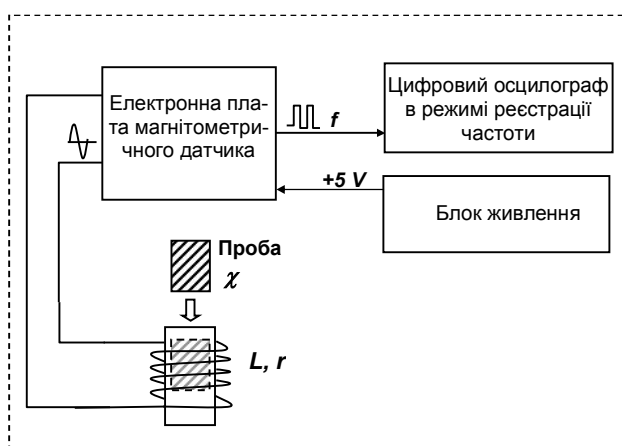


Рис. 2.7 Функціональна схема лабораторної установки для вимірювання магнітної сприйнятливості зразків залізної руди

Для вимірювань було відібрано 30 зразків залізної руди, масою 620-730 г, з вмістом заліза в діапазоні 0,4-31,4 %.

На першому етапі зразки по черзі поміщалися у внутрішню порожнину котушки, і реєструвалася зміна частоти в коливальному контурі f_l відносно частоти контуру без зразка f_0 яка дорівнювала 1040,3 Гц. За цим значенням, за формулою (2.1) обчислювалося значення Sx .

На другому етапі за допомогою електронних ваг визначалася маса зразків руди m . Після чого була обчислена питома магнітна сприйнятливість $\chi_0 = Sx/m$.

На третьому етапі зразки підлягали подрібненню до класу крупності -5 мм. скорочення обсягу до 100 г, подальшого подрібнення до -0,016 мм і передачі зразків в спеціалізовану лабораторію, де за допомогою хімічного аналізу визначили вміст корисного компонента (магнетиту) $Fe\ x/a$ в зразках.

На четвертому етапі проведено зіставлення результатів (табл. 2.1), побудова залежності $Fe = f(\chi_0)$, обчислення розрахункового вмісту корисного компонента в пробах за отриманою залежності $Fe\ розр.$, Оцінка збіжності результатів вимірювань.

Таблиця 2.1

Результати лабораторних випробувань автогенераторного МП

№ зразка	Частота f_l	Магнітна сприйнятливість, Sx	Вага m , г	Питома магн. сприйнятливість, $\chi_0 \cdot 10^{-3} \text{ Г}^{-1}$	$Fe\ x/a$, %	$Fe\ розр$, %	абс. похибка, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1070,074	0,000139	680,6	0,000204232	1,90	1,30	0,6
2	1070,195	0,000365	724,6	0,000503726	2,4	1,60	0,8
3	1071,589	0,002973	652,7	0,004554926	4,8	5,61	0,81
4	1081,3	0,021233	692,2	0,030674661	30,9	31,48	0,58
5	1070,066	0,000124	654,7	0,0001894	0,4	1,29	0,89
6	1080,597	0,019905	664,3	0,029963872	31,1	30,78	0,32
7	1079,223	0,017313	720,3	0,024035818	24	24,91	0,91
8	1076,299	0,011808	664,8	0,017761733	19,6	18,69	0,91
9	1079,143	0,017163	736,5	0,023303462	23,8	24,18	0,38
10	1078,383	0,01573	685,7	0,022940061	23	23,82	0,82
11	1076,31	0,011829	657	0,018004566	18,5	18,93	0,43
12	1077,332	0,013751	693,8	0,019819833	19,9	20,73	0,83
13	1078,782	0,016482	690,9	0,02385584	24,5	24,73	0,23
14	1076,661	0,012489	673,2	0,018551693	20,2	19,48	0,72
15	1075,832	0,01093	638,1	0,017128977	18,8	18,07	0,73
16	1076,677	0,012519	707,6	0,017692199	19,2	18,62	0,58
17	1074,756	0,008909	690,1	0,012909723	13,4	13,89	0,49
18	1079,674	0,018164	719	0,025262865	26,5	26,12	0,38

Продовження таблиця 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
19	1077,004	0,013135	659,8	0,019907548	20,3	20,82	0,52
20	1079,267	0,017396	728,2	0,023889041	24,5	24,76	0,26
21	1077,021	0,013166	665,5	0,019783621	21,2	20,70	0,5
22	1081,093	0,020843	681,8	0,030570549	31,4	31,38	0,02
23	1077,369	0,013822	668	0,020691617	21,9	21,60	0,3
24	1078,591	0,016123	661,5	0,024373394	25,9	25,24	0,66
25	1077,142	0,013395	645,5	0,020751356	22,3	21,65	0,65
26	1078,789	0,016496	678,8	0,024301709	25,3	25,17	0,13
27	1079,965	0,018713	723,8	0,025853827	27	26,71	0,29
28	1070,777	0,001453	630,2	0,002305617	3,4	3,39	0,01
29	1074,74	0,008879	620,9	0,014300209	15,1	15,26	0,16
30	1073,516	0,006582	653,2	0,010076546	10,8	11,08	0,28
						СКО:	0,27
						МАХ:	0,91

Графік залежності вмісту заліза в пробах від питомої магнітної сприйнятливості приведений на рис. 2.8.

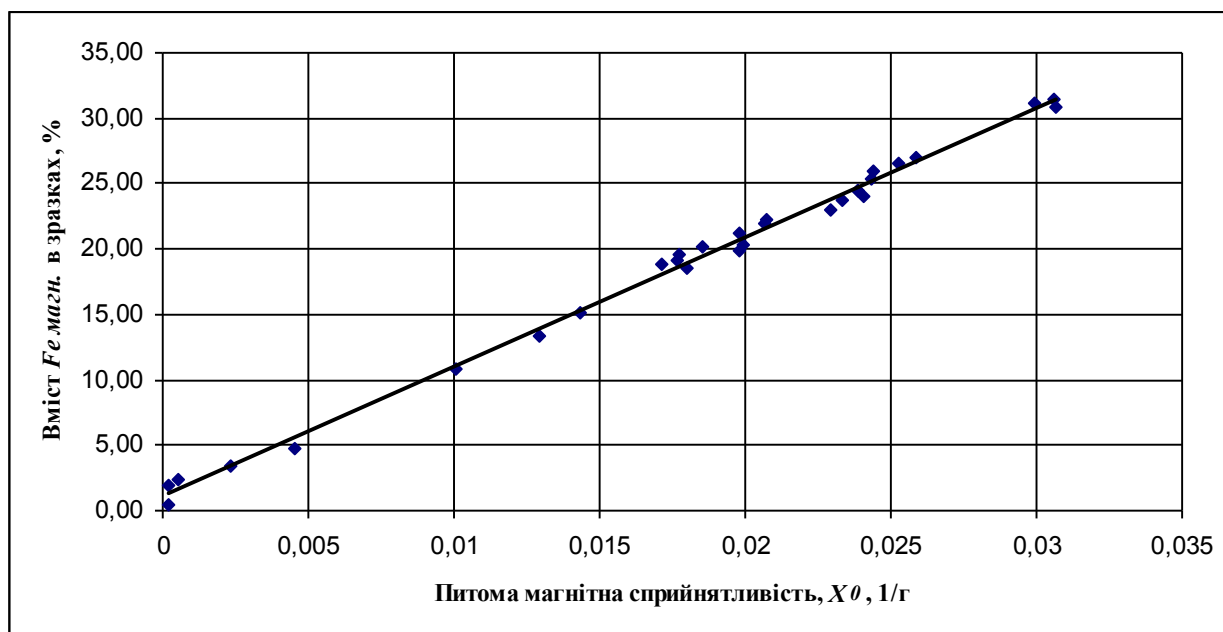


Рис. 2.8 Графік залежності вмісту заліза магнітного від питомої магнітної сприйнятливості.

З графіка, наведеному на рис. 2.8 можна стверджувати, що залежність прямолінійна і прямо пропорційна. Аналітичний вираз має вигляд:

$$Fe = 990399,957758946 * \chi_0 + 1,10 \quad (2.2)$$

де:

Fe – вміст заліза магнітного в зразках, %;

μ_0 - питома магнітна сприйнятливість матеріалу зразка, Г^{-1} .

Підставивши значення μ_0 , отримані на другому етапі, в аналітичний вираз (2.2) отримав розрахункове значення $Fe_{розр.}$ і зіставивши з $Fe_{x/a}$, що дало змогу обчислити абсолютну похибку вимірювань, результати наведені в таблиці 2.1.

Висновки:

Запропонована модель автогенераторного магнітометричного перетворювача дозволяє визначити зміст $Fe_{магн.}$ у зразках руди. При цьому середньоквадратичне відхилення показань становить 0,27, а похибка вимірювань $\pm 0,81 \%$.

2.5 Конструкція магнітного датчика

Вимірювальний канал магнітного датчика має форму циліндра, що складається з: каркасу 1, котушки індуктивності 2, магнітопроводу 3, накладки 4, з'єднувачів 5 та захисного чохла 6. Креслення магнітного датчика приведені на рис. 2.9.

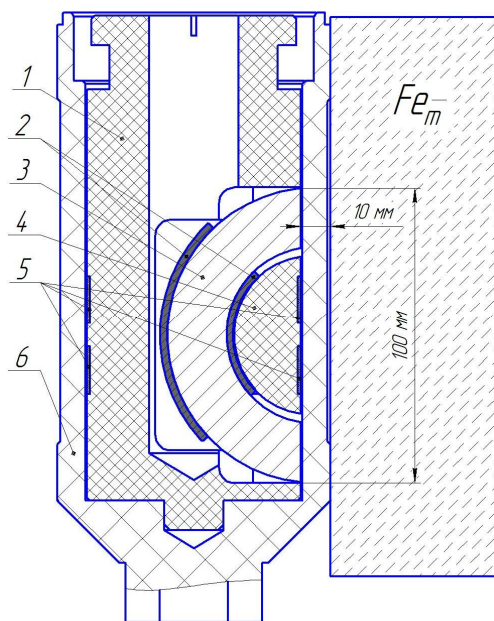


Рис. 2.9 Креслення магнітного датчика.

1 – каркас датчика; 2 – котушка індуктивності; 3 – магнітопровід; 4 – накладка; 5 – з'єднувачі; 6 – захисний чохол.

Тривимірна модель та загальний вигляд датчика приведено на рис. 2.10

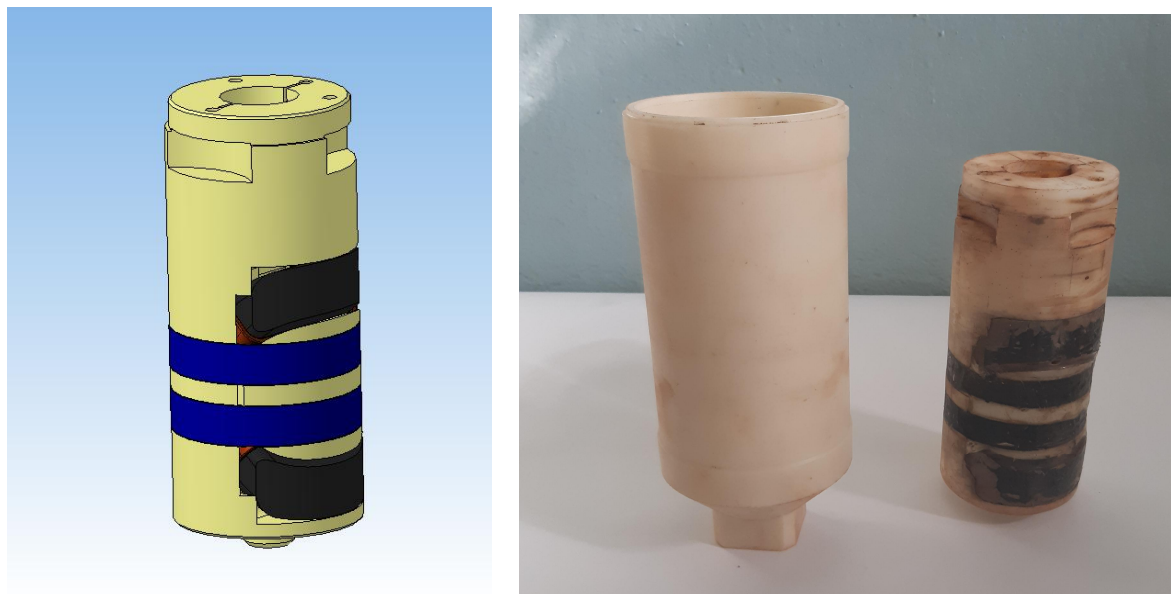


Рис. 2.10 Тривимірна модель та загальний вигляд магнітометричного датчика

Корпус, накладка та захисний чохол виконано з немагнітного матеріалу (поліамід-6).

Магнітопровід індуктивного датчика виконується з півкілець стандартного феритового тороїдального сердечника з магнітною проникністю $\mu = 400$ і розмірами: зовнішній діаметр - 100 мм, внутрішній діаметр - 60 мм, висота - 15 мм; ферит типу НН (можна НМ), що позначається в конструкторській документації: “Сердечник М 400НН-4-К100х60х15 - УВО.049 ТУ”

Півкільця з'єднуються між собою склеюванням епоксидною смолою. Котушка індуктивного датчика виконується мідним дротом типу ПЕЛ-0.55 і розташовується рівномірно по всій поверхні магнітопроводу; намотування щільно, без зазорів, виток до витка. Для зазначеного сердечника кількість витків становить 270. Індуктивність датчика на частоті 1 кГц становить $L = 13.6 \pm 0.05$ мГн, активний опір $r = 4.1 \pm 0.1$ Ом.

Експериментально встановлено, що величина зазору між полюсами магнітопровода і досліджуваним зразком, при якому забезпечується необхідна чутливість індуктивного перетворювача і мінімальний вплив

нерівності поверхні досліджуваного зразка на вимір магнітної сприйнятливості, лежить в діапазоні 3,5-16 мм. Результати аналізу даних показують, що діапазон повітряного зазору можна поділити на 3 ділянки: 1 - ділянка зміни повітряного зазору h в діапазоні 0-3,5 мм на якій незначна зміна h призводить до істотної зміни магнітної сприйнятливості; 2 - ділянка в діапазоні зміни h 3.5-16 мм, на якій зміна h майже не впливає на величину реєстрованої магнітної сприйнятливості; 3 - ділянка в діапазоні зміни h 16-55 мм, на якому недостатня чутливість індуктивного перетворювача [41].

Очевидно, що оптимальна відстань між поверхнею вимірювального середовища і площиною полюсів магнітопроводу становить 10 мм. Це обов'язкова умова. Враховуючи, що поверхня вимірювальної речовини має переважно циліндричну форму, діаметром 250 мм., необхідний зазор реалізований завдяки фігурній поверхні полюсів розімкнутого магнітопроводу.

Висновки по розділу

1. Аналіз літературних джерел, та засобів визначення вмісту заліза магнетитового, що успішно використовуються на рудах Криворізького басейну дав змогу визначити широко застосовувані методи та способи їх реалізації для визначення магнітної сприйнятливості залізорудної сировини;
2. Обрано індуктивний метод визначення магнітної сприйнятливості залізорудної сировини, як найбільш точний, технічно простий в реалізації та перспективний для створення засобів контролю якості заліза пов'язаного з магнетитом в умовах свердловин;
3. Розроблено функціональну схему автогенераторного індуктивного перетворювача, побудованого на базі операційного підсилювача, в ланцюг позитивного зворотного зв'язку якого включений послідовний коливальний контур, що складається з конденсатору і

вимірювальної котушки, в електромагнітне поле якої внесено досліджувану речовину. Розроблено принципову схему, та виготовлено макетний зразок.

4. За допомогою макету автогенераторного магнітометричного перетворювача встановлено залежність вмісту заліза магнетитового від магнітної сприйнятливості для руд Криворізького басейну;

5. Визначено похибку визначення заліза магнетитового, яка становить $\pm 0,81$ %;

6. Розроблено конструкцію вимірювальної котушки автогенераторного індуктивного перетворювача, що забезпечує вимірювання по сектору циліндричної поверхні досліджуваної речовини, діаметром 250 мм.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ, МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОПЕРАТИВНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ЗАЛІЗА ЗАГАЛЬНОГО

3.1 Фізичні процеси взаємодії гамма-квантів з речовиною

При проходженні через речовину гамма-кванти взаємодіють з атомами, електронами і атомними ядрами середовища. При цьому вони або поглинаються цілком, або втрачають частину своєї енергії, змінюючи напрямок поширення, тобто розсіюються, що призводить до ослаблення інтенсивності випромінювання.

Для гамма-квантів характерні наступні процеси взаємодії з речовиною: 1) фотоелектричне поглинання електронами атомів речовини (фотоефект); 2) пружне розсіювання на зв'язаних електронах речовини (релеївське розсіювання); 3) не пружне розсіювання на електронах речовини (комптонівське розсіювання); 4) повне поглинання в полі ядра, що супроводжується утворенням електронно-позитронної пари (ефект утворення пар); 5) ядерний фотоефект; 6) пружне і не пружне розсіювання на ядрі та інші.

Реєстрована інтенсивність гамма-випромінювання гірських порід в основному залежить від трьох фізичних явищ: фотоефекту, ефекту Комптона і ефекту утворення електронно-позитронної пари. Будь-який з цих процесів взаємодії носить імовірнісний характер і, отже, визначається середнім перетином взаємодії, який вимірюється в одиницях площі. Імовірність взаємодії радіоактивних випромінювань з електронною часткою в ядерній фізиці має назву мікроскопічного перерізу даного процесу. Залежно від того, буде частка захоплена ядром або при зіткненні тільки віддасть частину своєї енергії і змінить напрямок руху, розрізняють мікроскопічні перетини захоплення σ_z і розсіювання σ_p .

Існують поняття мікроскопічної і макроскопічної взаємодії гамма-квантів з речовиною. Під мікроскопічним перерізом слід розуміти взаємодію гамма-квантів з атомом хімічного елемента, під макроскопічними (лінійним) перетином - взаємодія гамма-квантів з атомами хімічних елементів одиниці об'єму речовини [46].

Фотоефект характерний для гамма-квантів з енергіями не більше 0,5 МеВ. Гамма-квант при проходженні через речовину може вступити у взаємодію з електронами атомів цієї речовини. Гамма-квант передає всю свою енергію і повністю поглинається, а електрон викидається за межі атома.

При фотоефекті гамма-квант може вибити пов'язані електрони, енергія E_i зв'язку яких менше енергії самого гамма кванта E_γ . Енергія викинутого за межі атома електрона дорівнює:

$$E_e = E_\gamma - E_i = \frac{m_e v^2}{2},$$

де m_e - маса електрона;

v_e - швидкість викинутого електрона.

Такий процес вибивання електрона з атома фотоном називається фотоефектом, а вирвані електрони - фотоелектронами. Атом, що втратив електрон, опиняється в збудженому стані. Звільнений рівень енергії в атомі заповнюється одним з зовнішніх електронів, при цьому випускається квант характеристичного (рентгенівського випромінювання), тобто фотоефект супроводжується характеристичним випромінюванням.

У деяких випадках енергія збудження безпосередньо передається одному з електронів, що залишають атом, і характеристичного випромінювання не відбувається. Це явище називається явищем Оже, а викинуті електрони - електронами Оже. Фотоефект на вільному електроні неможливий, так як при цьому не можуть бути одночасно виконуватись закони збереження енергії імпульсу для ізольованої системи квант-електрон.

Фотоелектрони вилітають переважно в напрямку, перпендикулярному до поширення поляризованого пучка гамма-променів малої енергії

(рис. 3.1 а) під кутом $\varphi \approx 90^\circ$. Виліт електронів Оже рівно імовірний у всіх напрямках.

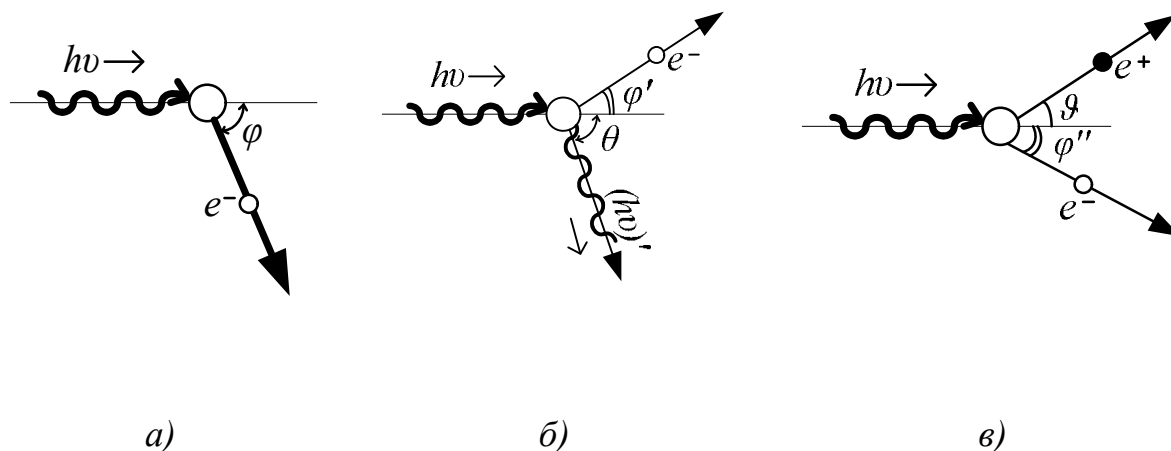


Рис. 3.1 Схематичне зображення процесів
а) – фотоефекту; б) - Комптонівської взаємодії; в) - утворення
електронно-позитронних пар.

Гамма-кванти малої енергії здатні вибити з атома лише оптичні електрони, що володіють малою енергією зв'язку. Гамма-кванти великої енергії можуть вибивати електрони з більш глибоких електронних шарів. Це обумовлює селективне фотопоглинання гамма-квантів з яскраво вираженими стрибками при $E_\gamma = E_i$.

Мікроскопічний перетин фотоефекту $\sigma_{\gamma f}$ залежить від порядкового номера елемента (Z) і енергії гамма-кванта. Воно збільшується зі зростанням Z , тобто з підвищенням щільності речовини, і зменшується зі збільшенням енергії гамма-кванта по складній залежності аналогічно його макроскопічному перетину. Для характеристики гірських порід, як складної системи по відношенню до гамма-променів замість порядкового номера, що відповідає окремому хімічному елементу, вводять величину ефективного атомного номера Z_{ef} , вважаючи, що ефективний атомний номер пов'язаний з деяким умовним середовищем певного порядкового номера.

Макроскопічний перетин фотоефекту (лінійний коефіцієнт фотопоглинання) визначається за формулою (в 1/см):

$$\mu_{\gamma f} = \sigma_{\gamma f} * n_A,$$

де $n_A = \delta/A$ – ядерна щільність речовини (δ – щільність речовини, A – відносна атомна маса) [47].

Комптонівська взаємодія (поглинання і розсіювання) спостерігається для гамма-квантів при енергії 0,2-3,0 MeV, і є основним механізмом взаємодії гамма-квантів з речовиною.

Комптонівська взаємодія проходить на електронах при енергіях гамма-квантів, які значно перевищують енергію зв'язку електронів на електронних орбітах. При цьому гамма-квант вступає у взаємодію з вільним або слабо зв'язаним електроном передає останньому частину своєї енергії і імпульсу, а сам змінює свій напрямок і набуває енергію, рівну $(h\nu)'$ і відхиляється під кутом θ до початкового напрямку. Електрон викидається з атома під кутом φ' до напрямку падаючого гамма-кванта (рис. 3.1 б). Зі збільшенням енергії гамма-квантів кут їх відхилення від первісного напрямку при комптонівській взаємодії закономірно зменшується.

Мікроскопічний перетин комптонівської взаємодії $\sigma_{\gamma k}$, так само як і при фотоефекті, залежить від порядкового номера елемента і енергії гамма-кванта, збільшуючись з ростом Z , тобто з підвищенням щільності речовини і зменшуючись з ростом E_γ (рис. 3.1 б).

Макроскопічна (лінійна) комптонівська взаємодія визначається кількістю n електронів в одиниці об'єму речовини:

$$\mu_{\gamma k} = n\sigma_{\gamma k} = \frac{\delta N_0 Z}{A} \sigma_{\gamma k},$$

де N_0 – число Авогадро. Для осадових порід відношення $Z/A \approx 0,5$, тому $\mu_{\gamma k} = 0,5 N_0 \delta \sigma_{\gamma k}$.

Розрізняють коефіцієнти комптонівського поглинання $\mu_{\gamma kn}$, що характеризує частку енергії, яка передається гамма-квантом електрону, і розсіювання $\mu_{\gamma kp}$, що визначає частину енергії, що уноситься розсіяним квантом, тобто:

$$\mu_{\gamma k} = \mu_{\gamma kn} + \mu_{\gamma kp}.$$

Співвідношення поглиненої і розсіяної енергії, а також величини кутів між напрямками падаючого фотона, вибитого комптонівського електрона і розсіяного фотона залежать від положення електрона в атомі щодо падаючого фотона в момент взаємодії гамма-кванта з атомом речовини. У загальному випадку відхилення розсіяного фотона можливо в будь-якому напрямку, в тому числі і зворотному.

Утворення електронно-позитронних пар. Зі збільшенням енергії гамма-квантів швидко зменшується фотоелектричне поглинання, трохи повільніше - комптонівська взаємодія (рис. 3.1 в). Починаючи з енергії близько 1,02 MeV, і при більших її значеннях, з'являється механізм утворення пар часток (електрон-позитрон). Електронно-позитронні пари утворюються при взаємодії гамма-квантів з гравітаційним полем ядра за рахунок поглинання енергії гамма-квантів [46].

Електрон і позитрон вилітають з атома хімічного елемента під деякими кутами φ'' і ϑ до напрямку гамма-кванта (рис. 3.1 в). При великих енергіях електрон і позитрон вилітають майже в напрямку поширення падаючих гамма-квантів.

Мікроскопічний перетин утворення електронно-позитронних пар $\sigma_{\gamma n}$ при середніх енергіях гамма-квантів зростає зі збільшенням енергії E_γ і порядкового номера Z елемента. Макроскопічний (лінійний) перетин утворення пар визначається виразом:

$$\mu_{\gamma n} = n\sigma_{\gamma n} = \frac{\delta N_0}{A} \sigma_{\gamma n}.$$

Таким чином при взаємодії гамма-квантів з речовиною частина енергії первинного гамма-випромінювання поглинається при утворенні електронів віддачі, фотоелектронів і пар електрон-позитрон, а частина зберігається у вигляді енергії розсіяного гамма-випромінювання. Іонізація на шляху поширення гамма-випромінювання відбувається в основному за рахунок вторинних електронів, що виникають при взаємодії гамма-випромінювання з речовиною.

При проходженні гамма-квантів в гірській породі найбільш імовірна наступна трансформація енергії: багаторазове Комптонівське розсіювання до енергії 0,1-0,05 MeV з передачею її атомним електронам, потім поглинання гамма-кванта при фотоефекті.

Повний лінійний коефіцієнт ослаблення гамма-квантів в речовині μ_γ складається з добутку коефіцієнтів фотоелектричного поглинання, комптонівського розсіювання і утворення електронно-позитронних пар.

Однак, на різних інтервалах енергії ослаблення гамма-квантів переважає той чи інший вид взаємодії: фотоефект переважає в області низьких енергій гамма-квантів (0,01-0,5 MeV), комптонівське розсіювання - в проміжній області (0,3-3 MeV), утворення електронно-позитронних пар - в області високих енергій (1,02 і більше).

Послаблення гамма-квантів в шарі речовини товщиною x відбувається по експоненціальному закону

$$I_\gamma = I_{\gamma 0} e^{-\mu_\gamma x},$$

де I_γ , $I_{\gamma 0}$ - інтенсивності гамма-випромінювання, що реєструються відповідно при наявності поглинаючої речовини і без неї. Однак в цьому випадку фіксуються тільки ті гамма-кванти, які не зазнали жодного акту взаємодії з речовиною. Насправді реєструється і частина гамма-квантів, що зазнали комптонівського розсіювання і досягли детектора.

Для наближеного розрахунку проходження гамма-квантів в речовині користуються ефективним коефіцієнтом поглинання $\mu_{\gamma \text{эф}}$, що враховує і розсіяні гамма-кванти, які досягли детектора гамма-випромінювання. Чисельні значення μ визначаються експериментально. Ослаблення потоку гамма-квантів в речовині в цьому випадку обчислюється за формулою:

$$I_\gamma = I_{\gamma 0} e^{-\mu_{\gamma \text{эф}} \cdot x}.$$

3.2 Фізичні основи методів розсіяного гамма-випромінювання

Методи розсіяного гамма-випромінювання засновані на вимірюванні інтенсивності штучного гамма-випромінювання, розсіяного породоутворюючими елементами в процесі їх опромінення потоком гамма-квантів. Інтенсивність цього випромінювання залежить від щільності та речовинного складу гірських порід.

Як відомо, основними процесами взаємодії гамма-квантів з породою є фотоелектричне поглинання, комптонівське розсіювання і утворення електрон-позитронних пар.

У методах розсіяного гамма-випромінювання в основному переважають фотоелектричне поглинання і комптонівське розсіювання гамма-квантів породою. в залежності від енергії опромінюючих гамма-квантів і речового складу гірської породи переважає той чи інший процес взаємодії з породою.

При взаємодії з гірською породою жорстких гамма-квантів ($E > 0,5 \text{ MeV}$) в початковий момент основну роль відіграє комптонівське розсіювання, в результаті якого жорстке гамма-випромінювання, втративши значну частину своєї енергії, переходить в м'яке гамма-випромінювання. Отже, в подальшому основну роль відіграє фотоелектричне поглинання гамма-квантів. Як зазначалося вище, ймовірність комптонівського розсіювання в кінцевому рахунку прямо пропорційно залежить від щільності гірської породи, а ймовірність фотоелектричного - від її речовинного складу і особливо від вмісту важких елементів. Завдяки цьому, реєструючи розсіяні гамма-кванти високої енергії, отримують Характеристику щільності гірської породи, а сумарна інтенсивність розсіяних гамма-квантів або виділена з неї м'яка складова гамма-випромінювання залежить як від щільності, так і від речового складу породи. На цьому засновані два методи (ГГМ-Щ) і літологічний, або гамма-гамма метод по м'якій компоненті (ГГМ-М).

При опроміненні гірської породи м'якими гамма-квантами з енергією $E < 0,5 \text{ MeV}$ в основному відбувається фотоелектричне їх поглинання нарівні з комптонівським розсіюванням. Внаслідок цього інтенсивність розсіяного породою м'якого випромінювання, як і в ГГМ-М, залежить від присутності в ній важких елементів з великими атомними номерами і в меншій мірі визначається її щільністю. Цей метод називається селективним гамма-гамма методом (ГГМ-С).

Селективний гамма-гамма метод відрізняється від ГГМ-М тим, що в ньому застосовується джерело м'якого гамма-випромінювання і на його покази впливає в основному речовий склад гірських порід (ефективний атомний номер).

В пристроях ГГМ-С найчастіше використовуються джерела Tu-170 , Se-75 , Ba-133 , Am-241 . Відстань від середини індикатора гамма-випромінювання до центру джерела гамма-квантів називається довжиною зонда.

Інтенсивність розсіяного гамма-випромінювання, що реєструється індикатором, залежить від речовинного складу породи, її щільності, довжини зонда, активності і природи джерела первинного гамма-випромінювання.

3.3 Методи та засоби реєстрації іонізуючого випромінювання

У радіометричних пристроях в якості блоку детектування можуть використовуватися газорозрядні, сцинтиляційні і напівпровідникові лічильники.

Газорозрядний лічильник - газонаповнений прилад, поставлений в режим роботи, що забезпечує реєстрацію інтенсивності ядерних частинок по виникненню газового розряду - явище протікання іонізаційного струму через газ. Газорозрядний лічильник - свого роду конденсатор. Одним електродом (анодом) служить тонка нитка з вольфраму, заліза або іншого металу діаметром 0,1-0,5 мм, натягнута вздовж осі скляного циліндра діаметром 1-3

см, другим електродом (катодом) є внутрішнє металеве покриття цього циліндра. Роль діелектрика виконує суміш газів, що створюють первинну іонізацію, з яких розвивається перша лавина іонів - початок безперервного (суцільного) розряду.

Основні переваги газорозрядних лічильників: 1) стабільність роботи у великому діапазоні зміни температури (від -55 до 300 °С) 2) необов'язковість стабільності напруги живлення; 3) підвищена ефективність до жорсткого гамма-випромінювання.

До недоліків відносяться: висока напруга живлення (700-1600 В); обмежений термін служби в наслідок витрати багатоатомних молекул на дисоціацію; мала максимальна швидкість рахунку.[21, 46]

Сцинтиляційний лічильник (рис. 3.2) складається з двох основних елементів: сцинтилятора, що реагує на ядерне випромінювання спалахами світла, і фотоелектронний помножувач (ФЕП), що перетворює ці слабкі спалахи світла в електричні імпульси і підсилює останні в мільйони разів.

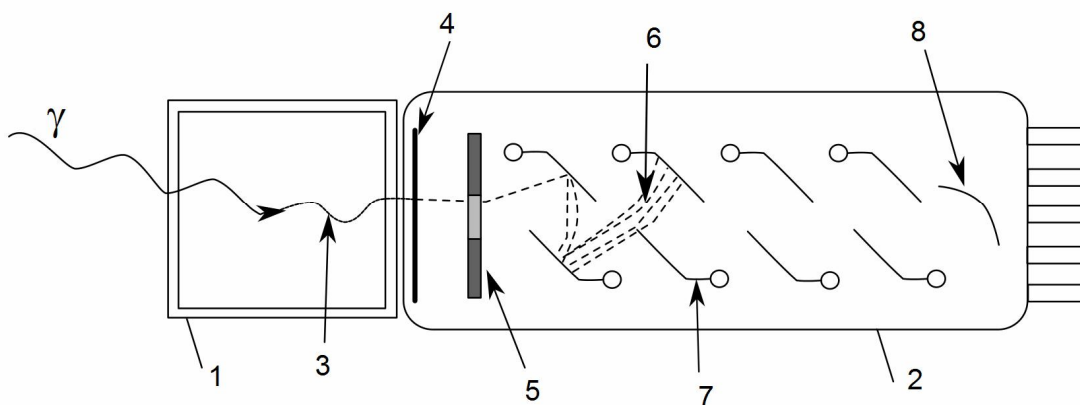


Рис. 3.2 Функціональна схема сцинтиляційного лічильника.

1 – сцинтилятор; 2 – фотоелектронний помножувач; 3 – світловий потік; 4 – фотокатод; 5 – фокусуєчий електрод; 6 – електронний потік; 7 – динод; 8 – анод.

Сцинтилятори (люмінофори). Принцип роботи сцинтилятора полягає в наступному. Гамма-квант, потрапляючи в сцинтилятор, взаємодіє з його атомами (фотоэффект і Комптон-ефект, утворення електронно-позитронних пар), що призводить до виникнення вільних зарядів (електронів і протонів).

Цим зарядам передається або вся енергія кванта (фотоефект), або її частина (Комптон-ефект, утворення пар). Енергія вільних зарядів витрачається на іонізацію і збудження атомів сцинтилятора. При переході із збудженого стану в основний атоми сцинтилятора втрачають енергію, отриману при порушенні, у вигляді електромагнітних коливань (світлових фотонів) - люмінесценції.

Розрізняють два види люмінесценції: флуоресценцію, коли світіння атома відбувається майже миттєво після порушення (10^{-9} - 10^{-7} с), і фосфоресценцію, коли порушені молекули знаходяться в метастабільних станів невизначений час. Для сцинтиляційних лічильників придатні люмінофори, що мають флуоресценцію (короткий час висвічування).

Утворені фотони світла в результаті взаємодії гамма-квантів з сцинтилятором розлітаються в усі сторони, частково поглинаються в товщі кристала сцинтилятора (ступінь поглинання залежить від довжини хвилі, речовини і розміру сцинтилятора), У зв'язку з цим, тільки частина фотонів потрапляє на фотопомножувач, при цьому форма спектра світлових фотонів, що виходять з сцинтилятора, відрізняється від спектра утворених фотонів. Для збільшення числа фотонів, що досягають катода, стінки сцинтилятора, крім контактуючої з фото помножувачем, покривають фотовідбиваючим шаром.

Основними характеристиками сцинтиляторів є фізична ефективність, світловий вихід оптична прозорість, щільність, середній атомний номер сцинтилятору і час висвічування.

Кількість світлових квантів n_0 , що виникають при проходженні через сцинтилятор електрично-зарядженої частинки, прямо пропорційно її енергії E :

$$n_0 = k_K \frac{E}{E_\phi},$$

де E_ϕ - середня енергія світлових фотонів; k_K - фізична ефективність люмінофора, що характеризує частку енергії випромінювання, перетвореної в світлові фотони.

Світловий вихід сцинтиляторів і їх оптична прозорість тісно пов'язані між собою і визначають частку енергії іонізуючих частинок, перетвореної в світлові фотони, які досягають фотокатода. Зменшення оптичної прозорості люмінофорів знижує їх світловий вихід, причому при неповній прозорості однакові за інтенсивністю світлові спалахи, що виникають в різних ділянках об'єму люмінофора, викликають на виході ФЕПа імпульси з різними амплітудами. Світловий вихід в більшості випадків зменшується з підвищенням температури люмінофора.

Зі збільшенням щільності і середнього атомного номера речовини люмінофора підвищується ймовірність реєстрації частки лічильником.

Ефективність сцинтиляційного лічильника залежить також від коефіцієнта поглинання гамма-випромінювання в люмінофорі, розмірів люмінофора, його геометрії, взаємного розташування джерела випромінювання і люмінофора становить понад 20 %.

Час появи люмінофорів характеризує роздільну здатність лічильників і змінюється в діапазоні 10^{-9} - 10^{-6} с. Важливою характеристикою люмінофорів є також лінійна залежність їх ефективності від енергії досліджуваних частинок, що дозволяє застосовувати їх в спектрометрії і реєстрації штучного гамма-випромінювання.

Для сцинтиляторів найбільш часто застосовуються монокристали йодистого натрію NaJ(Tl), йодистого калію KJ(Tl), йодистого цезію CsJ(Tl), активовані талієм Tl з метою створення в ґратах неорганічних кристалів додаткових центрів люмінесценції, а також пластмасові сцинтилятори. Для реєстрації гамма-випромінювання в умовах природного залягання порід, найчастіше використовують монокристали NaJ(Tl), які характеризуються найбільш високою ефективністю рахунку. Їх основний недолік - висока гігроскопічність. У разі потрапляння в кристал вологи, він мутніє і, отже,

знижуються його експлуатаційні характеристики. Цього недоліку позбавлені CsJ(Tl), проте вони відрізняються меншою, ніж у NaJ(Tl), роздільною здатністю і зниженим світловим виходом [48, 49].

Кристали KJ(Tl) через підвищений власного фону гамма-випромінювання, обумовленого присутністю в них ^{40}K , при реєстрації гамма-випромінювання в умовах природного залягання гірських порід, застосовуються рідко.

Пластмасові люмінофори типу Р-терфніла мають низьку щільність і малий середній атомний номер, а отже, знижену ефективність .

Фотоелектричний помножувач (ФЕП) - пристрій (рис. 3.3), що сполучає в собі фотоелемент електронний підсилювач, дія якого заснована на явищі вторинної електронної емісії. Фотони з сцинтилятора потрапляють на фотокатод ФЕП.

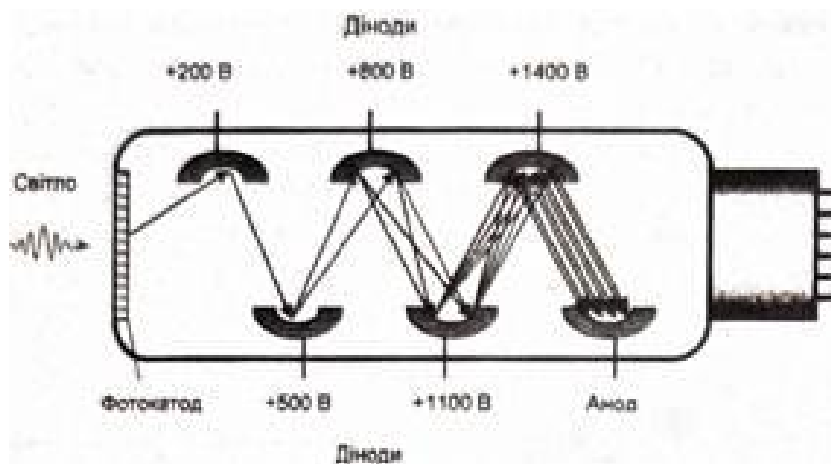


Рис. 3.3 Фотоелектричний помножувач

Електрони, що вилетіли з фотокатода, прискорюються електричним полем і через діафрагму спрямовуються на перший електрон (динод) помножувача. Внаслідок вторинної емісії кожен електрон, що впав вибиває з динода кілька вторинних електронів, кількість яких залежить від прикладеної між електродами різниці потенціалів. Ці електрони, перебуваючи в полі тяжіння другого динода, також прискорюються і викликають вторинну електронну емісію на наступному диноді. Таким чином відбувається стрибкоподібне збільшення кількості електронів на кожному диноді

фотоелектричного помножувача. Останнім електродом в цьому ланцюзі є анод, який для усунення непотрібної тепер вторинної емісії електронів іноді виконується у вигляді сітки і оточується екраном, сполученим з передостаннім електродом [50].

Основні характеристики ФЕП: квантовий вихід, чутливість фотокатода, інтегральна анодна чутливість, коефіцієнт вторинної емісії, коефіцієнт збирання електронів і число динодів, лінійність світлової характеристики, величина відношення амплітуди корисних сигналів до амплітуди «шумових» сигналів і роздільний час сцинтиляційних лічильників.

Квантовий вихід фотокатода характеризує ймовірність виривання електрона фотонів, що потрапили на фотокатод, і досягає 30 % при сур'яно-цезієвого катоді. Чутливість фотокатода часто оцінюють не по квантовому виходу а по величині його інтегральної чутливості.

Інтегральна анодна чутливість визначає відношення фотоструму (мкА) до падаючого на фотокатод світлового потоку (лм) при його освітленні джерелом білого світла і досягає декількох десятків тисяч ампер на люмен.

Коефіцієнт вторинної емісії динодів визначається роботою, яку повинні зробити частинки, щоб вилетіти з речовини динодів. Коефіцієнт збирання електронів являє собою відношення числа електронів, що надходять на даний динод, до числа електронів, що залишають попередній динод, і залежить від орієнтування осі динода по відношенню до вектору магнітного поля Землі.

Число динодів визначає повне посилення електронів фотопомножувача і коливається від 8 до 14.

Величина відношення амплітуди корисних сигналів до амплітуди «шумових» сигналів - важлива характеристика ФЕПу. Шумові імпульси виникають за рахунок так званого темного струму, що протікає в фотоелектронному помножувачі, на який подано напругу навіть в умовах повного затемнення. Причиною виникнення темного струму є термоелектронна емісія фотокатода і динодів помножувача, а також інші явища. Амплітуда шумових імпульсів визначає нижню межу енергії і

інтенсивності досліджуваних випромінювань, які можуть бути зареєстровані сцинтиляційним лічильником. Мінімальний рівень шумів забезпечується з підвищеною фізичною ефективністю, хорошим світлозбіром і високою квантовою ефективністю фотокатода [51].

Роздільний час сцинтиляційних лічильників залежить від тривалості сцинтиляції і діапазону часів прольоту електронних груп через помножувач і становить до 10^{-9} с.

Основні переваги сцинтиляційних лічильників: 1) висока чутливість (ефективність), до гамма-променів; 2) велика роздільна здатність ($\tau_{\text{лч}} = 10^{-9}$ с.); здатність розрізняти частки по їх енергії і вимірювати її. Таким чином сцинтиляційні лічильники мають більш високою ефективністю і роздільною здатністю.

Недоліки сцинтиляційних лічильників: 1) висока чутливість до зміни температури навколишнього середовища; 2) підвищені вимоги до стабільності напруги живлення; 3) великий діапазон параметрів фотопомножувачів і зміна характеристик і параметрів в процесі їх роботи.

Напівпровідникові лічильники - використовується властивість односторонньої провідності електричного струму. Для цього створюють певний шар, званий р-n переходом і що має високий питомий опір. Дві пластини напівпровідника, одна з електронною провідністю, а інша - з дірковою, знаходяться в тісному контакті.

При проходженні іонізуючої частинки через чутливий шар в ньому відбувається іонізація і утворюються вільні носії заряду, які під дією електричного поля дрейфують до відповідних електродів, тобто з'являється імпульс електричного струму.

Для реєстрації гамма-квантів необхідні напівпровідникові лічильники з великою товщиною чутливого (запірного) шару. Це досягається впровадженням літію, який має високий коефіцієнт дифузії, в один з торців напівпровідника з дірковою провідністю.

Напівпровідникові детектори відрізняються економічністю живлення, компактністю, нечутливістю до магнітного поля, а також амплітудною чутливістю, в 20-30 разів вище сцинтиляційних детекторів. Однак їх застосування обмежується порівняно невеликими розмірами напівпровідникових детекторів і нестабільною роботою при підвищених температурах [46].

3.4 Методи розрахунку поширення гамма - квантів при використанні гамма - гамма методу.

Для розрахунку поширення гамма - випромінювання в ядерній геофізиці застосовують спрощені аналітичні методи теорії переносу випромінювання. Найбільшого поширення набули променеве наближення, наближення одноразової взаємодії і дифузно - вікове наближення.

Променеве наближення. В цьому випадку нехтують зміною енергії випромінювання і напрямком його поширення, вважаючи, що випромінювання в середовищі прямолінійне. Для наближеного опису багаторазового розсіювання частинок необхідно враховувати властивості середовища, джерела, детектора і геометрію вимірювань. При спектрометричних вимірах цим методом розраховують ослаблення високоенергетичних гамма - квантів, що виникають при розпаді ядр урану, торію і калію [47].

Наближення одноразової взаємодії. У цьому наближенні враховують тільки одноразову взаємодію з атомами речовини - поглинання, розсіювання або збудження іншого виду випромінювання. Зазначене наближення одноразової взаємодії може бути застосовано для енергій менше 100 - 200 кеВ в умовах селективного гамма - гамма методу, а також для збудження флуоресцентного випромінювання або гамма - нейтронної реакції.

Дифузно-вікове наближення. Це наближення враховує зменшення кількості гамма-квантів в елементарному обсязі за рахунок їх вільного руху і

поглинання або накопичення гамма - квантів в досліджуваному середовищі. При розрахунках гамма - розподілу в віковому наближенні вважають, що всі гамма - кванти із заданою енергією несуть однакові втрати енергії, при одному акті комптонівського розсіювання на один і той же кут. Дифузно - вікове наближення найбільш широко застосовується для вивчення розподілу нейтронного випромінювання. Залежність щільності потоку розсіяних гамма - квантів від щільності середовища має інверсійний характер. Довжина зонда приблизно дорівнює довжині вільного пробігу первинних квантів в контрольованому середовищі. Цей метод можна застосовувати для визначення ефективного атомного номера гірських порід при селективному гамма - гамма методі (ГГМ-С).

Статистичне моделювання методом Монте-Карло. За допомогою ЕОМ математично моделюють окремі історії частинок, починаючи від моменту їх появи до виходу з зони контролю. За допомогою генераторів випадкових чисел розігруються ефекти взаємодії, кути розсіювання, довжини пробігу, втрати енергії, Методом статистичного усереднення шуканих випадкових величин по великому числу траєкторій моделюють поле розподілу гамма - квантів. Розрахунок ведеться до заданої кількості історій, наприклад до $N = 10000$. Метод Монте-Карло представляє математичний експеримент, який дуже повільно сходиться. Цей метод добре відображає формування вторинних спектрів випромінювання для рентгенофлуоресцентного методу аналізу речовини [52].

3.5 Обґрунтування конструкції свердловинних пристроїв і визначення оптимальних умов вимірювань гамма-гамма методу.

Конструкція свердловинного пристрою виконується так, щоб джерело і детектор іонізуючого випромінювання були в свинцевому контейнері. Блок, де розташований детектор та джерело, за допомогою пристрою

притискається до стінки свердловини за допомогою спеціальної пружини. Відстань R між джерелом і детектором називають довжиною зонда.

Мета досліджень обґрунтувати вибір оптимального зонда для визначення ефективного атомного номера породи, з якої складається стінка свердловини. Якщо довжина зонда набагато більше довжини пробігу гамма - квантів джерела, то розсіювання гамма - променів математично можна моделювати процесом дифузії частинок, що поглинаються [12]. Характеристики колімованих пристроїв можна визначати в наближенні однократного розсіювання. Колімований пристрій ГГМ працює в геометрії прямої видимості, коли джерело і детектор зближені так, що проекції коліматорів джерела і детектора поєднані ($R = 0$). Тоді щільність потоку розсіяного випромінювання буде обернено пропорційна повному масовому ефективному коефіцієнту ослаблення потоку гамма – квантів [53].

Саме аналіз залежності щільності потоку розсіяного випромінювання від безрозмірного параметра $\xi = \bar{\mu} \cdot \rho \cdot R = R/l$ створює можливість обґрунтувати вибір конструкції зонда, де $\bar{\mu}$ - повний масовий коефіцієнт ослаблення потоку гамма - квантів; ρ - щільність породи; R - довжина зонда, l - довжина вільного пробігу первинних квантів в середовищі.

Заінверсійні пристрої. Для щільнісного гамма-гамма методу ГГМ-Щ є оптимальними заінверсійні пристрої, у яких зі збільшенням щільності середовища експоненціально зменшується інтенсивність розсіяного випромінювання. Для зменшення впливу речового складу необхідно застосовувати джерела з більш жорстким випромінюванням (0,66 - 1,25) МеВ. Для зменшення вкладу м'якого випромінювання потрібно застосовувати залізні або свинцеві фільтри або відсікати малі (по амплітуді) імпульси за допомогою дискримінаторів. Зазвичай довжина зондів для ГГМ-Щ становить 15-40 см

Рівноважні пристрої. Для встановлення ступеня розсіювання гамма випромінювання простіше використовувати рівноважні зонди, довжина яких дорівнює R_p , де характеристики на межі насичення. В цьому випадку

інтенсивність, що реєструється буде нижче, ніж в насиченому зонді. Розрахунками встановлено, що при $Z_{ef} = 17$ речовий склад не впливає на результати вимірювання щільності середовища. Довжина рівноважного зонда залежить від енергії джерела гамма-випромінювання і щільності порід, що вміщують і може бути визначена за формулою

$$R \approx (1 / \overline{\mu_{ef}}) n$$

де $n \approx 1 \text{ см}^3 / \rho$.

Для залізних руд Криворізького басейну, щільністю 2,6-4,1 г/см³ розрахункова довжина рівноважного зонда при $E_\gamma = 660 \text{ кеВ}$ дорівнює 17 см, а експериментальна 16 см

Інверсійні пристрої. Для селективного гамма-гамма методу ГГМ-С зручно використовувати інверсійні зонди, що працюють в області максимуму функції розсіювання, де результати вимірів не залежать від зміни щільності середовища. При цьому вплив щільності можна виключити в невеликому діапазоні. Для розширення області компенсації впливу щільності середовища застосовують зонди з двома джерелами випромінювання, розташованими на різних відстанях від детектора. При цьому виходить два зонда, характеристики яких лежать відповідно в доінверсійній і заінверсійній областях кривої розсіювання.

Очевидно, що зі збільшенням щільності інтенсивність розсіяного випромінювання спочатку зростає, а після досягнення максимуму плавно зменшується. Змінюючи довжину зонда можна вибрати область його роботи в доінверсійній, інверсійній або заінверсійній зоні характеристики, що дозволяє зменшити вплив щільності на результати ГГМ-С.

Потужність джерел гамма - випромінювання при збільшенні довжини зонда збільшується в пропорції $R1 \setminus R2$. Завдяки своїй конструкції подвійні зонди ГГМ-С найбільш стійкість. При використанні джерел м'якого випромінювання з енергією 100-200 кеВ глибинність досліджень для двохзондового пристрою ГГМ-С становить кілька сантиметрів.

У нульових зондах, довжина зонда близька до нуля, вони працюють в геометрії прямої видимості. При цьому інтенсивність розсіяного випромінювання обернено пропорційна масовому коефіцієнту ослаблення і не залежить від щільності. Нормовану щільність потоку розсіяного випромінювання можна визначити за формулою

$$\bar{I} \approx \text{const} / \overline{\mu_{\text{эф.}}}$$

Для забезпечення щільного прилягання зонда до стінки свердловини застосовують спеціальні притискні пристрої. Їх конструкцію вибирають в залежності від ступеня зміни розмірів свердловини: це можуть бути пружинні, ресорні або з важелями. Автором обрано пружинні притискаючі пристрої, що забезпечує більш точне орієнтування пристрою в свердловині і полегшують його конструкцію.

3.6 Математична модель оптимізації параметрів геометрії вимірювання розсіяного гамма-випромінювання

Завданням даної роботи є дослідження впливу геометричних параметрів детекторів і джерел гамма-випромінювання на точність визначення вмісту заліза в мінеральній сировині, що дозволяє синтезувати структуру математичної моделі, параметри якої можна розрахувати за експериментальними даними. Разом з тим, синтезована структура моделі дає можливість виділити якісні особливості досліджуваного явища з метою знаходження оптимальних параметрів.

Модельований процес визначення вмісту заліза в гірській породі розглянемо з одним джерелом іонізуючого випромінювання.

На рис. 3.4 приведена геометрична схема вимірювального вузла реєстрації інтегрального потоку гамма - випромінювання розсіяного гірничою масою.

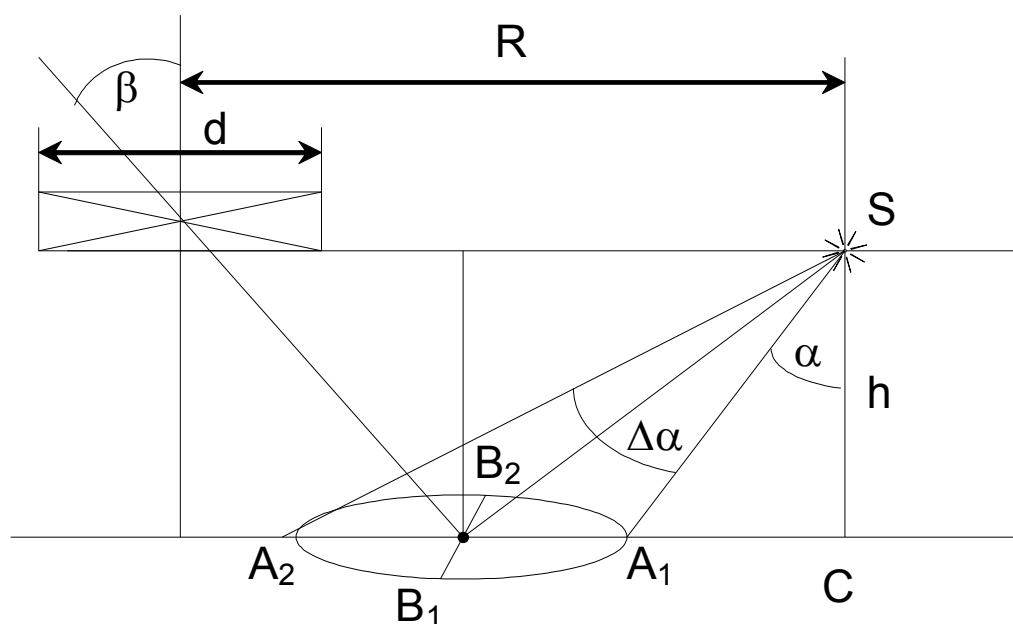


Рис. 3.4 Геометрична схема реєстрації розсіяного гамма-випромінювання

Проблема оптимізації геометричних параметрів вимірювального пристрою полягає в тому, щоб реєстрована детектором інтенсивність розсіяного гамма-випромінювання була малочутлива до зміни відстані між детектором та контрольованою поверхнею [54, 55].

Математична модель розсіювання гамма-випромінювання речовиною розглянута в наближенні одноразової взаємодії, враховуючи тільки геометричні параметри [56, 57].

Первинна інтенсивність джерела гама-випромінювання, що падає на досліджувану поверхню, розраховується за формулою:

$$dn = \frac{QdS}{4h^2} \cdot \cos^3 \alpha, \quad (3.1)$$

де Q – активність джерела гамма-випромінювання; h – відстань від детектора до досліджуваної поверхні; α - кут падіння гамма-випромінювання на досліджувану поверхню; dS - площа «плями» потоку гама-випромінювання на досліджуваній поверхні [58].

На рис. 3.4 опромінена площа потоку первинного гамма-випромінювання виділена у вигляді області A_1, B_1, A_2, B_2 . Для знаходження площі області A_1, B_1, A_2, B_2 обчислимо OA_1, OA_2, OB_1, OB_2 :

$$OA_1 = OC - A_1C = h \left(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \left(\alpha - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \right)$$

або

$$OA_1 = h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\Delta \alpha}{2} \right) \cdot \left(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \left(\alpha - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \right),$$

де $\Delta \alpha$ - кут колімації джерела гамма-випромінювання.

Аналогічно знаходимо:

$$OA_2 = A_2C - OC = h \cdot \left(\operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\Delta \alpha}{2} \right) - \operatorname{tg} \alpha \right)$$

або

$$OA_2 = h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\Delta \alpha}{2} \right) \cdot \left(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \right).$$

Згідно рис. 3.4 отримуємо:

$$OB_1 = OB_2 = \frac{h}{\cos \alpha} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\Delta \alpha}{2} \right). \quad (3.2)$$

Якщо прийняти, що $\frac{\Delta \alpha}{2} \ll \alpha$, то $\operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \approx \operatorname{tg} \alpha$.

В результаті отримуємо:

$$OA_1 = OA_2 = h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\Delta \alpha}{2} \right) \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)$$

або

$$OA_1 = OA_2 = h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\Delta \alpha}{2} \right) \cdot \frac{1}{\cos^2 \alpha}. \quad (3.3)$$

Враховуючи (3.1) і (3.2), можна зробити висновок, що область A_1 , B_1 , A_2 , B_2 є еліпсом з півсями (3.1) і (3.2). Тому величина площі dS знаходиться за формулою

$$dS = \pi \cdot OA_1 \cdot OB_1$$

або з врахуванням (3.1) і (3.2)

$$dS = \pi h^2 \cdot \frac{\operatorname{tg}^2 \left(\frac{\Delta \alpha}{2} \right)}{\cos^3 \alpha}. \quad (3.4)$$

Тоді інтенсивність потоку гамма-випромінювання, що падає на досліджувану поверхню, прийме після підстановки (3.4) в (3.1) вид:

$$dn = \frac{Q}{4} \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right) \quad (3.5)$$

Інтенсивність потоку гамма-випромінювання, розсіяного досліджуваною поверхнею і досягнувшого детектора, знаходиться за формулою:

$$N = \frac{d \cdot n_0 \cdot \cos \beta}{4\pi \cdot OD^2} \cdot S, \quad (3.6)$$

де $dn_0 = A \cdot dn$,

A - коефіцієнт, що характеризує ступінь розсіювання первинного потоку гама-випромінювання від досліджуваної поверхні (альbedo);

β - кут, який утворює потік розсіяного гамма-випромінювання з площиною детектора;

S - площа поверхні детектора, що реєструє вторинне гамма-випромінювання;

OD - відстань від центру детектора до центру "плями" первинного гамма-випромінювання на досліджуваній поверхні.

Згідно рис. 3.4 знаходимо:

$$OD = \frac{\sqrt{R^2 \cos^2 \alpha - R \cdot h \cdot \sin 2\alpha + h^2}}{\cos \alpha},$$

$$\cos \beta = \frac{h}{OD} = \frac{h \cdot \cos \alpha}{\sqrt{R^2 \cos^2 \alpha - R \cdot h \cdot \sin 2\alpha + h^2}} \quad (3.7)$$

Враховуючи, що робоча поверхня детектора є колом діаметра d , знаходимо площу цієї поверхні:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.8)$$

Підставляючи (3.7) і (3.8) в (3.6), а також враховуючи (3.5), отримуємо формулу, яка визначає інтенсивність потоку гамма-випромінювання, розсіяного досліджуваною поверхнею в залежності від геометричних параметрів, зображених на рис. 3.4:

$$N = A \cdot \frac{Q \cdot d^2}{64} \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right) \cdot \frac{h \cdot \cos^3 \alpha}{\left(R^2 \cos^2 \alpha - R \cdot h \cdot \sin 2\alpha + h^2\right)^{3/2}} \quad (3.9)$$

або

$$N = B \cdot \frac{h \cdot \cos^3 \alpha}{\left(R^2 \cos^2 \alpha - R \cdot h \cdot \sin 2\alpha + h^2\right)^{3/2}}, \quad (3.10)$$

де $B = A \cdot \frac{Q \cdot d^2}{64} \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\Delta \alpha}{2}\right)$ - змінна, яка не залежить від геометричних параметрів.

Математична модель (3.10) дозволяє досліджувати залежність інтенсивності вторинного гамма-випромінювання N від відстані h між робочою поверхнею вимірювального приладу і досліджуваною поверхнею при різних значеннях геометричних параметрів R і α .

З огляду на інверсійний характер функціональної залежності (3.10), знайдемо координати точки інверсії. З цією метою обчислимо похідну (3.10) по змінній h і прирівняємо її нулю. Для зручності розрахунків попередньо прологарифмуємо (3.10):

$$\ln N = \ln B + \ln h + 3 \ln(\cos \alpha) - \frac{3}{2} \ln(R^2 \cos^2 \alpha - R \cdot h \cdot \sin 2\alpha + h^2).$$

Тоді:

$$\frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dh} = \frac{1}{h} - \frac{3}{2} \cdot \frac{-R \cdot \sin 2\alpha + 2h}{(R^2 \cos^2 \alpha - R \cdot h \cdot \sin 2\alpha + h^2)}.$$

Прирівнюючи похідну нулю і враховуючи, що $N \neq 0$, отримуємо квадратне рівняння щодо h/R :

$$4\left(\frac{h}{R}\right)^2 - \frac{h}{R} \sin 2\alpha - 2 \cos^2 \alpha = 0.$$

Вирішуючи це рівняння, знаходимо координати точки інверсії:

$$h_0 = R \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \left(\sin \alpha + \sqrt{1 + 7 \cos^2 \alpha}\right)}{4}. \quad (3.11)$$

Обчислимо значення функції (3.2) в точці інверсії, підставивши (3.3):

$$N(h_0) = B \cdot \frac{16}{R^2} \frac{\cos \alpha \cdot \left(\sin \alpha + \sqrt{1 + 7 \cos^2 \alpha}\right)}{\left(17 + 7 \cos 2\alpha - 6 \sin \alpha \sqrt{1 + 7 \cos^2 \alpha}\right)^{3/2}}. \quad (3.12)$$

Необхідно визначити, при якому значенні кута α координата точки інверсії буде максимальна. З цією метою обчислимо похідну (3.3) і прирівняємо її нулю:

$$\frac{dh_0}{d\alpha} = \frac{R}{4} \cdot \left(\cos 2\alpha - \sin \alpha \cdot \sqrt{1 + 7 \cos^2 \alpha} - \frac{7 \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{\sqrt{1 + 7 \cos^2 \alpha}} \right). \quad (3.13)$$

Вирішимо отримане рівняння відносно α :

$$\begin{aligned} \cos 2\alpha \sqrt{1 + 7 \cos^2 \alpha} - \sin \alpha (1 + 7 \cos^2 \alpha) - 7 \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha &= 0, \\ (2 \cos^2 \alpha - 1) \cdot \sqrt{1 + 7 \cos^2 \alpha} &= \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} \cdot (1 + 14 \cos^2 \alpha) = 0. \end{aligned}$$

Позначимо $x = \cos^2 \alpha$, тоді:

$$\begin{aligned} (2x - 1) \cdot \sqrt{1 + 7x} &= \sqrt{1 - x} \cdot (1 + 14x) = 0, \\ (2x - 1)^2 (1 + 7x) &= (1 - x) \cdot (1 + 14x^2) = 0. \end{aligned}$$

Відкриваючи дужки і приводячи подібні, отримуємо:

$$x \cdot (56x^2 - 41x - 13) = 0.$$

Звідки: $x_1 = 0$, $x_2 = 0.971$ або, $\cos^2 \alpha = 0$, $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$, $\cos^2 \alpha = 0.971$,

або $\alpha^2 = 10^\circ$.

Якщо розглянути зміни знака похідної щодо $\alpha^2 = 10^\circ$, то отримуємо, що при $\alpha^2 = 10^\circ$ максимум. На рис. 3.4 показана залежність координати точки інверсії від кута нахилу джерела гамма-випромінювання, розрахована за формулою (3.11).

Аналіз графіку показує, що при $\alpha = 10^\circ$ спостерігається максимальне значення координати точки інверсії.

В межах $0 \leq \alpha \leq 25^\circ$ не спостерігається значних змін h_0 , і тільки при $\alpha > 25^\circ$ спостерігається різке зменшення величини h_0 .

Залежність величини потоку вторинного гамма-випромінювання, розрахована за формулою (3.11), від кута нахилу джерела гамма-випромінювання в точці інверсії представлена на рис. 3.5



Рис. 3.5 Залежність координати точки інверсії h_0 від кута нахилу α джерела гамма-випромінювання

Функції (3.10) і (3.11) описують параметричне представлення функціональної залежності величини потоку вторинного гамма-випромінювання від координати точки інверсії. Графік залежності $N=f(h_0)$ після виключення параметра α представлений на рис. 3.7.



Рис. 3.6 Залежність інтенсивності інтегрального потоку вторинного гамма-випромінювання, від кута нахилу джерела гамма-випромінювання в точці інверсії

Аналіз графіка зображеного на рис. 3.6 показує, що потік вторинного гамма-випромінювання досягає максимуму, якщо $\frac{4h_0}{R} \approx 1.26$ або $h_0 \approx 0.315R$.

В даному випадку $\alpha=61^\circ$.

Для знаходження ширини інверсійної зони необхідно вирішити рівність щодо h :

$$\frac{N(h_0) - N(h)}{N(h_0)} = \varepsilon, \quad (3.14)$$

де ε - допустима похибка вимірювання потоку вторинного гамма-випромінювання.

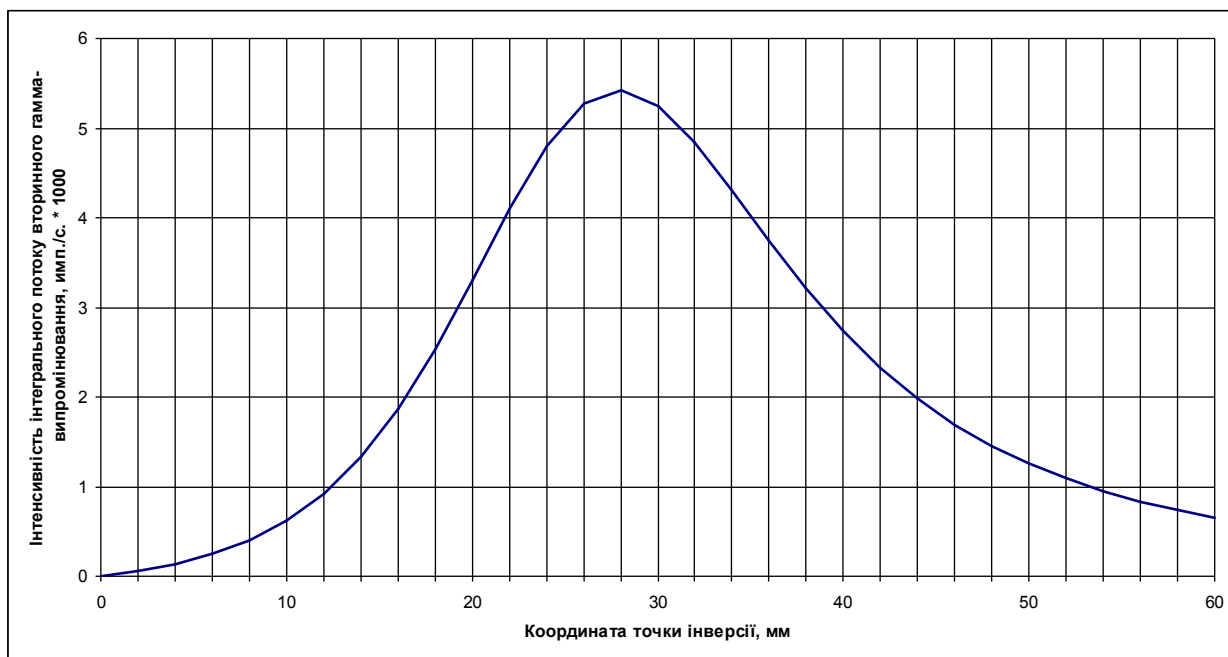


Рис. 3.7 Залежність інтенсивності інтегрального потоку вторинного гамма-випромінювання від координати точки інверсії

Підставляючи (10) і (11) в (13) після перетворень отримуємо рівняння щодо h :

$$\frac{x}{\left(1 - 2tg \alpha \cdot x + x^2 \cdot (1 + tg^2 \alpha)\right)^{3/2}} = \frac{16 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \cos \alpha \cdot \left(\sin \alpha + \sqrt{1 + 7 \cos^2 \alpha}\right)}{\left(17 + 7 \cos^2 \alpha - 6 \sin \alpha \sqrt{1 + 7 \cos^2 \alpha}\right)^{3/2}}, \quad (3.15)$$

де $x = \frac{h}{R}$.

Отримане рівняння (3.15) є нелінійним і його вирішення можливе тільки чисельними методами.

Для спрощення розрахунків формулу (10) розкладемо в ряд Тейлора в наближенні точки інверсії h_0 :

$$N(h) \approx N(h_0) + \frac{N''(h_0)}{2} \cdot (h - h_0)^2. \quad (3.16)$$

У формулі (16) похідна першого порядку відсутня, так як вона дорівнює нулю.

Підставляючи (16) в (14), знаходимо границі інверсійної зони:

$$h_{1,2} = h_0 \pm \sqrt{\frac{2\varepsilon N(h_0)}{-N''(h_0)}}. \quad (3.17)$$

З (3.17) отримуємо шукану ширину інверсійної зони з центром в точці інверсії h_0 :

$$\Delta h = 2 \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon N(h_0)}{-N''(h_0)}}. \quad (3.18)$$

Обчислимо похідну другого порядку в точці інверсії $h = h_0$. З цією метою перетворимо формулу (11) до вигляду:

$$N = \frac{B \cdot \cos \alpha}{R^2} \cdot \frac{x}{(1 - 2x \sin \alpha + x^2)^{3/2}}, \quad (3.19)$$

де $x = \frac{h}{R \cdot \cos \alpha}$.

Обчислюємо похідну першого порядку за допомогою логарифмічного диференціювання.

$$\ln N = \ln \frac{B \cos \alpha}{R^2} + \ln x - \frac{3}{2} \ln(1 - 2x \sin \alpha + x^2),$$

$$\frac{N'(x)}{N(x)} = \frac{1}{x} - \frac{3}{2} \cdot \frac{-2 \sin \alpha + 2x}{1 - 2x \sin \alpha + x^2}$$

або

$$N'(x) = \left(\frac{1}{x} + 3 \frac{\sin \alpha - x}{(1 - 2x \sin \alpha + x^2)} \right) \cdot N(x).$$

Далі знаходимо:

$$N''(x) = \left(-\frac{1}{x^2} + 3 \frac{-(1 - 2x \sin \alpha + x^2) + 2(\sin \alpha - x)^2}{(1 - 2x \sin \alpha + x^2)^2} \right) \cdot N(x) + \left(\frac{1}{x} + 3 \frac{\sin \alpha - x}{1 - 2x \sin \alpha + x^2} \right) \cdot N'(x).$$

Враховуючи, що похідна другого порядку знаходиться в точці інверсії, тобто $N'(x_0) = 0$, то отримуємо:

$$N''(x_0) = -\frac{1 - 4x_0 \sin \alpha + x_0^2(5 - 2\sin^2 \alpha) + 14x_0^3 \sin \alpha - 2x_0^4}{x_0^2(1 - 2x_0 \sin \alpha + x^2)^2} \cdot N(x_0)$$

Тоді ширина інверсійної зони (17) розраховується за формулою:

$$\Delta h = R \cdot \frac{2 \cos \alpha \cdot x_0 (1 - 2x_0 \sin \alpha + x_0^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \varepsilon}}{\sqrt{2x_0^4 - 14x_0^3 \sin \alpha - x_0^2(5 - 2\sin^2 \alpha) + 4x_0 \sin \alpha - 1}}, \quad (3.20)$$

де $x_0 = \frac{\sin \alpha + \sqrt{1 + 7 \cos^2 \alpha}}{4}$.

Величина похибки вимірювання ε , залежить від відстані джерела гамма-випромінювання до детектора R і кута нахилу джерела гамма-випромінювання α .

На рис. 3.8 приведено залежність величини $\frac{\Delta h}{R\sqrt{\varepsilon}}$ від кута нахилу джерела, розрахована за формулою (3.20).

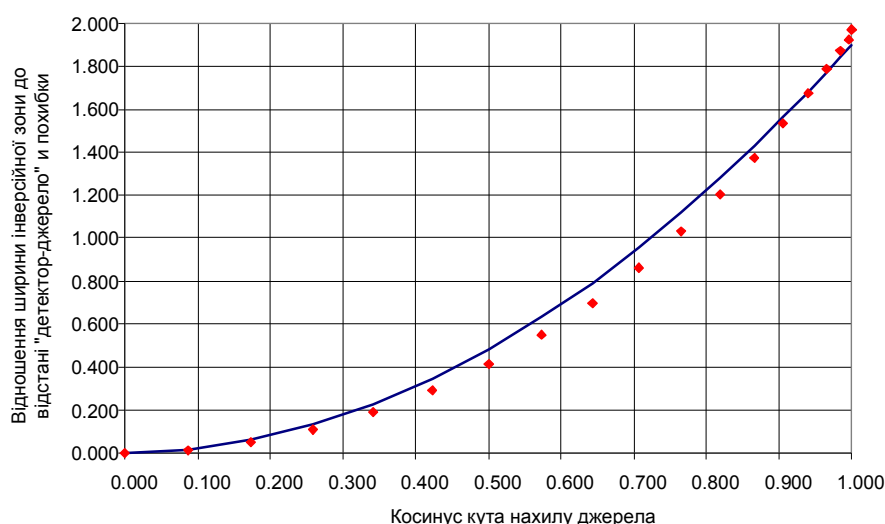


Рис. 3.8 Залежність величини $\frac{\Delta h}{R\sqrt{\varepsilon}}$ від кута нахилу джерела, розрахована за формулою (20)

Аналіз форми кривої зображеної на рис. 3.8 показує, що її можна апроксимувати параболою. Параметри, які були знайдені методом найменших квадратів:

$$\frac{\Delta h}{R\sqrt{\varepsilon}} = 0.031 \cdot \cos \alpha + 1.869 \cdot \cos^2 \alpha \quad (3.21)$$

На рис. 3.8 точками показані значення, розраховані за формулою (3.21), які вказують на досить гарний збіг значень функцій (3.20) і (3.21).

В результаті отримуємо формулу для розрахунку ширини інверсійної зони:

$$\Delta h = R \cdot \sqrt{\varepsilon} (0.031 + 1.869 \cos \alpha) \cdot \cos \alpha \quad (3.22)$$

Отримані формули (3.11), (3.12), (3.22) дозволяють розрахувати ширину інверсійної зони при одному джерелі гамма-випромінювання.

3.7 Апробація селективного гамма-гамма методу на зразках руд Криворізького басейну

Метою даної роботи є дослідження можливості застосування селективного гамма-гамма методу для визначення вмісту корисного компонента в рудах Криворізького басейну.

Дослідження проводилися на лабораторній установці, зображеній на рис. 3.9., яка складається з вузла вимірювання, розміщеного в захисній шафі (рис. 3.9 а), Блоку високовольтного живлення БНВ-30-01 і блоку низьковольтного живлення БНН-151 (рис. 3.9 б) і пристрою реєстрації імпульсів (рис. 3.9 в).



Рис. 3.9 Лабораторна установка для вимірювання інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання гірською породою.

а) – вимірювальний вузол; б) – блок живлення; в) – реєстратор імпульсів.

Функціональна схема приведена лабораторної установки зображена на рис. 3.10. Вузол вимірювання 2 має жорстко зв'язані геометричні параметри між джерелом гамма-випромінювання 3 і блоком детектування (сцинтиляційним лічильником) 4, а також забезпечує задану відстань до поверхні досліджуваного зразка 1.

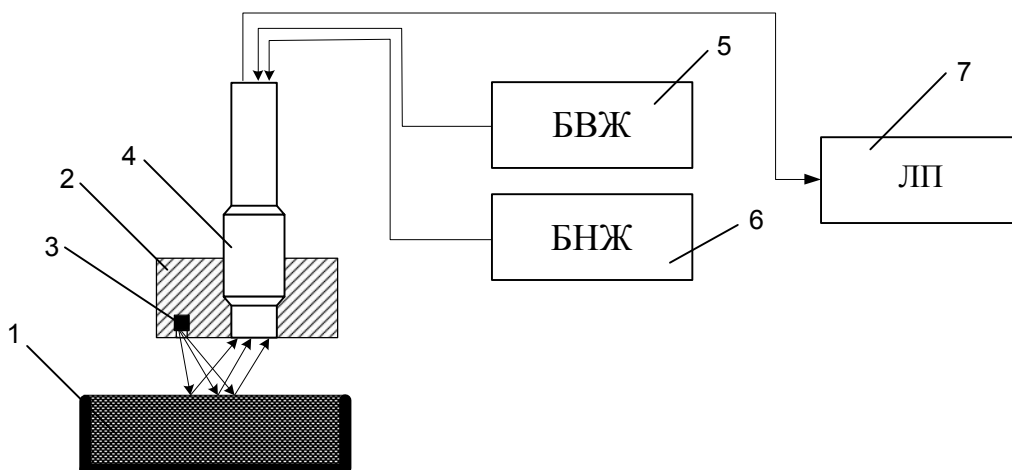


Рис. 3.10 Функціональна схема лабораторної установки

1 - кювета з досліджуваним зразком; 2 - вузол вимірювання; 3 - джерело іонізуючого випромінювання; 4 - блок детектування БДЕГ2-23; 5 - блок високовольтного живлення БНВ-30-01; 6 - блок низьковольтного живлення БНН-151; 7 - рахунковий прилад ПСО2-5.

В якості штучного джерела було обрано джерело гамма-випромінювання типу ІГІА-1-2 на основі ізотопу Am-241 з енергією 60 кеВ і активністю 3.7×10^8 Бк. Діаметр колімаційного каналу 5 мм.

Реєстрація розсіяного гамма-випромінювання проводилася за допомогою блоку детектування типу БДЕГ2-23 (зовнішній вигляд якого наведено на рис. 3.11) на основі сцинтиляційного блоку з кристалом NaJ(Tl) розміром $\varnothing 63 \times 63$ мм, фотоелектронного помножувача ФЕУ-82 і попереднього підсилювача, в якому, гамма-кванти, потрапляючи на кристал сцинтиляційного блоку, перетворюються в світлові спалахи, а за допомогою фотоелектронного помножувача перетворюються в імпульси напруги.



Рис. 3.11 Блок детектування БДЕГ2-23

Реєстрація кількості імпульсів проводилася за допомогою рахункового одноканального приладу ПСО2-5 (рис. 3.9 в). Час експозиції одного виміру вибрано 10 сек.

Відібрано 79 зразків руди, з відомим вмістом корисного компонента за даними хімічного аналізу, подрібненої до класу крупності -5 мм, (для повного усереднення матеріалу в обсязі проби) в діапазоні вмісту корисного компонента 50-67 %.

Проби по черзі засипалися в кювету, рівномірно ущільнювалися, вирівнювались по висоті бічних стінок і загладжувались. Після чого проби вносились в зону опромінення джерела, і запускалась реєстрація інтенсивності.

Отримані результати зареєстрованої блоком детектування інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання наведені в табл. 3.1

Таблиця 3.1

Результати дослідження можливості застосування селективного гамма-гамма методу на рудах Криворізького басейну

№ проби	Fe х/а	Інтенсивність гамма-випромінювання, N, імп./с	Fe розр	Абс. Похибка, %
1	2	3	4	5
1	52.49	13132	52.2	0.29
2	52.25	13091	52.41	0.16
3	53.07	12771	53.96	0.89
4	52.01	13055	52.59	0.58
5	52.5	13021	52.75	0.25
6	53.97	12638	54.59	0.62
7	49.76	13660	49.34	0.42

Продовження таблиця 3.1

1	2	3	4	5
8	51.6	13271	51.49	0.11
9	56.33	12390	55.78	0.55
10	56.82	12180	56.82	0
11	56.82	12155	56.95	0.13
12	54.62	12564	54.94	0.32
13	55.19	12606	54.74	0.45
14	54.53	12656	54.5	0.03
15	56.9	12191	56.76	0.14
16	54.53	12554	54.99	0.46
17	55.17	12528	55.11	0.06
18	54.69	12617	54.69	0
19	54.3	12598	54.78	0.48
20	55.41	12330	56.07	0.66
21	56.52	12375	55.85	0.67
22	57.63	12194	56.75	0.88
23	56.52	12084	57.31	0.79
24	57.88	12069	57.39	0.49
25	57.06	12189	56.77	0.29
26	57.51	12054	57.47	0.04
27	57.55	12055	57.46	0.09
28	57.96	11920	58.19	0.23
29	57.9	12003	57.74	0.16
30	58.21	12007	57.72	0.49
31	58.25	11969	57.92	0.33
32	57.71	11938	58.09	0.38
33	59.02	11815	58.78	0.24
34	58.45	11955	58	0.45
35	59.43	11670	59.63	0.2
36	58.61	11812	58.79	0.18
37	58.61	11796	58.89	0.28
38	59.02	11692	59.5	0.48
39	59.1	11754	59.13	0.03
40	58.9	11830	58.69	0.21
41	59.51	11741	59.21	0.3
42	59.43	11790	58.92	0.51
43	58.69	11831	58.69	0
44	59.84	11704	59.43	0.41
45	59.27	11859	58.53	0.74
46	59.54	11557	60.33	0.79
47	58.26	11855	58.55	0.29
48	61.12	11531	60.5	0.62
49	60.69	11468	60.91	0.22
50	60.65	11513	60.61	0.04
51	60.33	11564	60.29	0.04
52	60.96	11436	61.12	0.16
53	60.65	11402	61.35	0.7
54	60.49	11428	61.18	0.69
55	61.4	11384	61.48	0.08
56	60.13	11590	60.12	0.01
57	60.4	11546	60.4	0
58	60.01	11560	60.31	0.3
59	60.73	11388	61.45	0.72

Продовження таблиця 3.1

1	2	3	4	5
60	62	11347	61.73	0.27
61	61.3	11368	61.59	0.29
62	61.21	11374	61.55	0.34
63	61.44	11291	62.13	0.69
64	62	11325	61.89	0.11
65	61.05	11449	61.03	0.02
66	62.99	11106	63.53	0.54
67	64.1	11026	64.17	0.07
68	62.6	11326	61.88	0.72
69	66.78	10807	66.08	0.7
70	67.1	10803	66.12	0.98
71	61.9	11381	61.5	0.4
72	67.23	10711	66.99	0.24
73	65.14	10831	65.86	0.72
74	65.77	10801	66.14	0.37
75	66.09	10811	66.05	0.04
76	64.23	11104	63.54	0.69
77	63.75	11045	64.02	0.27
78	62.05	11209	62.74	0.69
79	65.6	10775	66.38	0.78
			СКО	0.26
			MAX	0.98

За даними табл. 3.1 побудовано графік залежності вмісту заліза загального від інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання, який наведений на рис. 3.12. Проаналізувавши графік, можна стверджувати, що залежність має поліноміальний характер і обернено пропорційна [59, 60].

Отримано аналітичний вираз залежності заліза загального від інтенсивності (3.23), що дало можливість отримати розрахункове значення заліза загального Fe розр. за результатами зареєстрованої інтенсивності N .

$$Fe = -4 \cdot 10^{10} \cdot N^3 + 0.0000145210 \cdot N^2 - 0.1897209563 \cdot N + 899.98, \quad (3.23)$$

де Fe - розрахункове значення заліза загального, %;

N - інтенсивність розсіяного гамма-випромінювання, імп./с.

Порівнявши розрахунковий вміст заліза загального з вмістом заліза, за даними хімічного аналізу визначено похибку вимірювань, яка дорівнює $\pm 0,78$ %, що підтверджує можливість та доцільність використання данного методу, для визначення вмісту заліза загального в рудах Криворізького басейну.

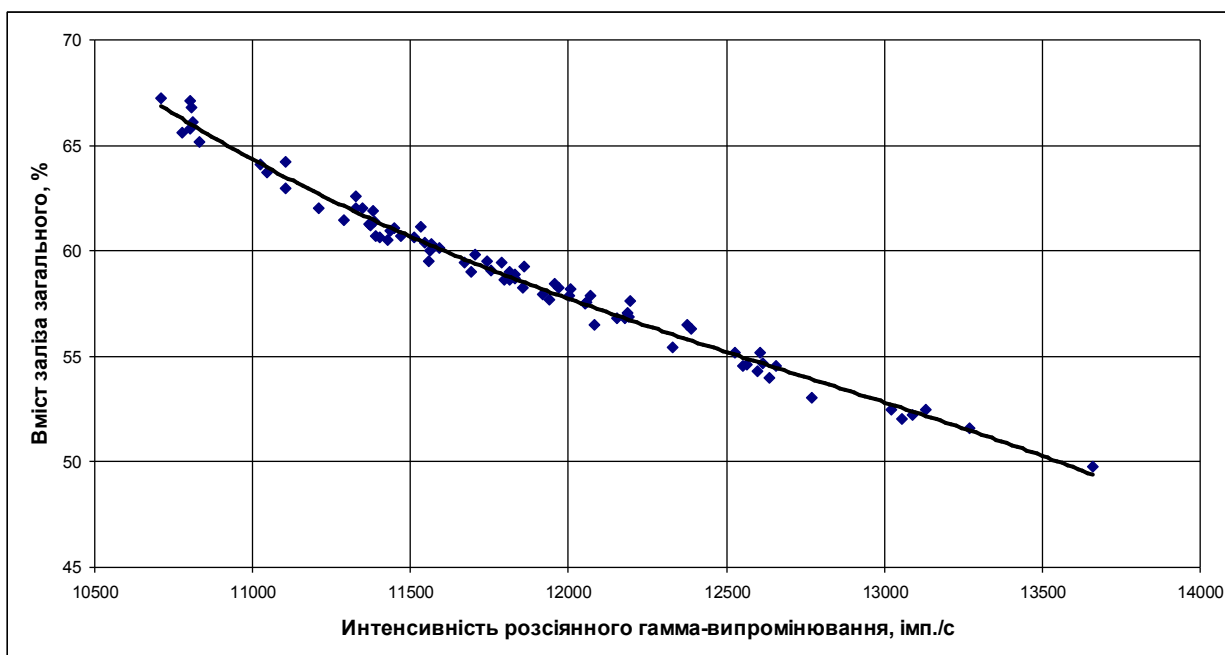


Рис. 3.12 Графік залежності вмісту заліза загального від інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання

Висновки по розділу

1. Критичний аналіз та узагальнення фізичних процесів взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною, а також умов, при яких вони відбуваються, було визначено переваги методів розсіяного випромінювання для визначення вмісту заліза загального;
2. Узагальнено різновиди гамма-гамма методу для визначення фізичних властивостей гірських порід. Визначено доцільність та переваги селективного гамма-гамма методу для визначення речовинного складу залізних руд;
3. Проведено аналіз способів та засобів реєстрації іонізуючого випромінювання, які можливо застосовувати в приладах контролю якості в умовах свердловини. Визначено переваги сцинтиляційних лічильників, завдяки їх високій ефективності та роздільній здатності;
4. Розроблено математичну модель оптимізації геометричних параметрів вимірювальної зони інверсійного зонду, для визначення найбільшої величини інтенсивності інтегрального потоку розсіяного гамма-

випромінювання зареєстрованої блоком детектування. При цьому оптимальний кут нахилу джерела іонізуючого випромінювання $\alpha=61^\circ$ а оптимальна відстань від зондового пристрою до досліджуваної поверхні становить 28 мм;

5. Отримано надійну кореляційну залежність вмісту заліза загального від зареєстрованої датчиком інтенсивності інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання;

6. Доведено придатність використання селективного гамма-гамма методу для визначення вмісту заліза загального в рудах Криворізького басейну. При цьому досягається точність визначення вмісту заліза на рівні $\pm 0,78\%$.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧИННИКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ КОРИСНОГО КОМПОНЕНТА В ЗАЛІЗОРУДНІЙ СИРОВИНІ

4.1 Узагальнення чинників

На точність визначення якісних показників при гамма-гамма методом істотний вплив можуть здійснювати чинники, пов'язані зі зміною фізичних і хімічних властивостей досліджуваних речовин а також мінливість геометричних умов вимірювань, тобто: елементний склад гірських порід і руд, їх вологість, щільність, відстань між зондовим пристроєм і поверхнею досліджуваного середовища, чужорідний прошарок між досліджуваною поверхнею та зондовим пристроєм.

4.2 Дослідження впливу речовинного складу гірських порід на інтенсивність інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання.

Як відомо гірські породи Криворізького басейну мають складний, речовинний склад, тобто анізотропний – гетерогенний [61].

Для оцінки поглинаючих (а як наслідок і розсіювальних) властивостей гетерогенних середовищ, вводиться спеціальний параметр – «ефективний атомний номер» (Z_{ef}). По суті, це атомний номер деякого фіктивного хімічного елементу, який має такий же ефект фотопоглинання на одиницю електронної щільності, як і досліджувана речовина складного речовинного складу.

На відміну від інших фізико-хімічних параметрів гірських порід, ефективний атомний номер однозначно визначається елементним складом

мінеральної сировини і не залежить від мінливості хімічних зв'язків або ж фізичного стану середовища [62].

Формула обчислення ефективного атомного номеру:

$$Z_{ef} = \sqrt[m]{\frac{1}{\beta_{cp}} \cdot \sum_{i=1}^n q_i \cdot \beta_i \cdot Z_i^m}, \quad (4.1)$$

де q_i - ваговий вміст i -го елементу досліджуваної гірської породи;

β_i - електронна щільність i -го елементу досліджуваної гірської породи;

Z_i - атомний номер i -го елементу досліджуваної гірської породи.

Електронна щільність компонентів, що входять до складу досліджуваної гірської маси, визначається за виразом:

$$\beta_i = Z_i / A_i, \quad (4.2)$$

де A_i - атомна вага i -го елементу.

Для гірських порід величина «середнього» атомного складу постійна [63, 64]. Для цих же гірських порід ($15 \leq Z_i < 40$), де енергія K -стрибка фотопоглинання лежить нижче реєстрованої енергії розсіяного гамма-випромінювання коефіцієнт $m=3.0$. Зі збільшенням реєстрованої енергії гамма-квантів до 1 МэВ коефіцієнт $m=3.5$ [6].

Практичне значення Z_{ef} полягає, передусім, в тому, що з його допомогою можна оцінити вплив речовинного складу досліджуваного середовища, як на ефект поглинання, так і розсіювання гамма-квантів.

Таким чином, значення Z_{ef} дозволяє аналізувати речовинний склад досліджуваної гірської маси в усьому діапазоні вмісту корисного компонента і забезпечує використання селективного гамма-гамма методу, як методу визначення вмісту корисного компоненту в гірській породі.

За допомогою Z_{ef} можна систематизувати (класифікувати) гірські породи з різним речовим складом з точки зору застосованості того або

іншого гамма-методу для оперативного визначення вмісту корисного компонента.

Крім того, Z_{ef} дозволяє багатокомпонентну гірську масу розглядати як двокомпонентну (бінарну), таку, що складається з корисного компонента і наповнювача.

Ефективний атомний номер проби можна визначити по наступній формулі:

$$Z_{ef} = Z_A \cdot \sqrt[3]{\sum q_i \cdot (Z_i / Z_A)^3}, \quad (4.3)$$

де Z_A - атомний номер визначуваного елементу (наприклад, заліза), а підкореневий вираз характеризує еквівалентний вміст i -го елементу, тобто:

$$q_i^{екв} = (Z_i / Z_A)^3 \cdot q_i. \quad (4.4)$$

Якщо в досліджуваному середовищі один з елементів наповнювача з атомним номером Z_1 заміщається в рівних вагових якостях іншим елементом з атомним номером Z_2 , то еквівалентний приріст вмісту визначуваного елементу обчислюється за формулою:

$$\Delta q_{екв} = q \cdot (Z_2^3 - Z_1^3) / Z_A^3, \quad (4.5)$$

де q - вміст визначуваного елементу.

Як приклад розглянемо речовинний склад залізних руд Криворізького басейну, приведений в таблиці 4.1, де $\Delta q_{екв}$ розраховані для $q=10\%$. Оскільки основним домішковим компонентом, що впливає на похибку вимірювання, є кремнезем (Si), то цей хімічний елемент вибраний в якості опорного.

Залежність ефективного атомного номеру від еквівалентного вмісту приведена на рис. 4.1. Аналітична залежність має наступний вигляд:

$$Z_i = 13.921 + 3.062 \Delta q_{екв} - 0.48 \Delta q_{екв}^2 + 0.051 \Delta q_{екв}^3 - 0.001 \Delta q_{екв}^4 - 1.028e-4 \Delta q_{екв}^5. \quad (4.6)$$

Речовинний склад залізних руд Криворізького басейну

Хімічний елемент	Na	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Ti	Cr	Mn
Z_i	11	12	13	14	15	16	20	22	24	25
$\Delta q_{екв}, \%$	-0.86	-0.5	-0.31	0	0.36	0.77	2.99	4.5	6.3	7.3

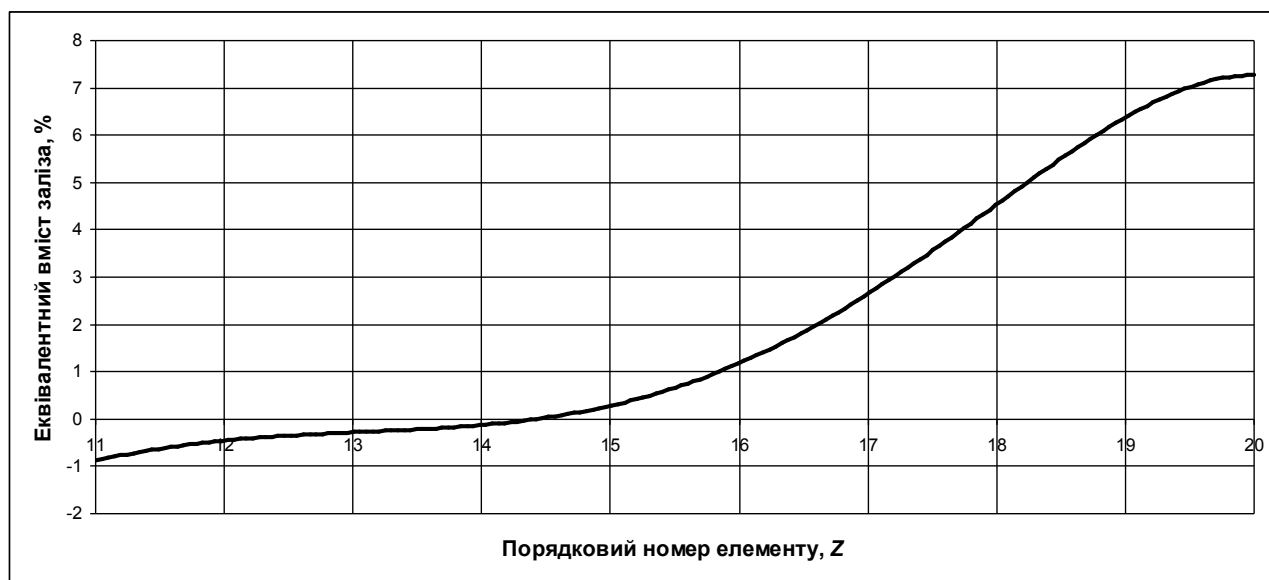


Рис. 4.1 Залежність ефективного атомного номеру від еквівалентного вмісту гірської маси

З таблиці 4.1 видно, що за наявності у складі гірської маси (наповнювача) хімічних елементів з $Z < 14$ еквівалентний вміст заліза знижується, а наявність важчих елементів, навпаки збільшує еквівалентний вміст $\Delta q_{екв}$.

У таблиці 4.2 приведені різновиди залізних руд Криворізького басейну, їх повний речовинний склад і ефективний атомний номер, розрахований за формулою:

$$Z_{эф} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n q_i \cdot Z_i^3}, \quad (4.7)$$

де q_i , Z_i - ваговий вміст і порядковий номер i -го елементу відповідно; n - кількість хімічних елементів в досліджуваній гірській масі.

Таблиця 4.2

Різновиди залізних руд Криворізького басейну, їх повний речовинний склад і ефективний атомний номер

Різновид руд	Мартитова	Гідрогематитова	Гідрогематитовий роговик	Гідрогематитовий сланець
1	2	3	4	5
Al_2O_3	-	4.96	15.5	23.4
SiO_2	0.8	4.4	17.8	33.5
Fe_2O_3	97.8	87.2	54.5	20.2
FeO	0.5	0.9	0.75	5.5
CaO	-	0.2	0.3	5.5
MgO	-	0.04	-	0.2
P	-	0.05	0.07	0.014
TiO_2	0.04	-	-	0.02
$Fe_{заг}$	69.9	61.7	40.9	0.46
Z_{ef}	23.9	22.3	19.6	18.31

З графіку залежності ефективного атомного номера від вмісту заліза (рис. 4.2) очевидно, що зі збільшенням вмісту корисного компонента атомний номер росте пропорційно. Аналітична залежність має вигляд:

$$Z_{ef} = \sqrt[3]{15568Fe_{заг}^2 + 3015.36} . \quad (4.8)$$

В якості опорного елементу приймаємо кремнезем ($Z=14$) і обчислюємо ефективний атомний номер залізної руди, де вміст заліза змінюється від 10 до 70 %. В якості компонента прийнято кремнезем, як основного домішкового компонента, вміст якого змінюється від 90 до 30 % відповідно (таблиця 4.3).

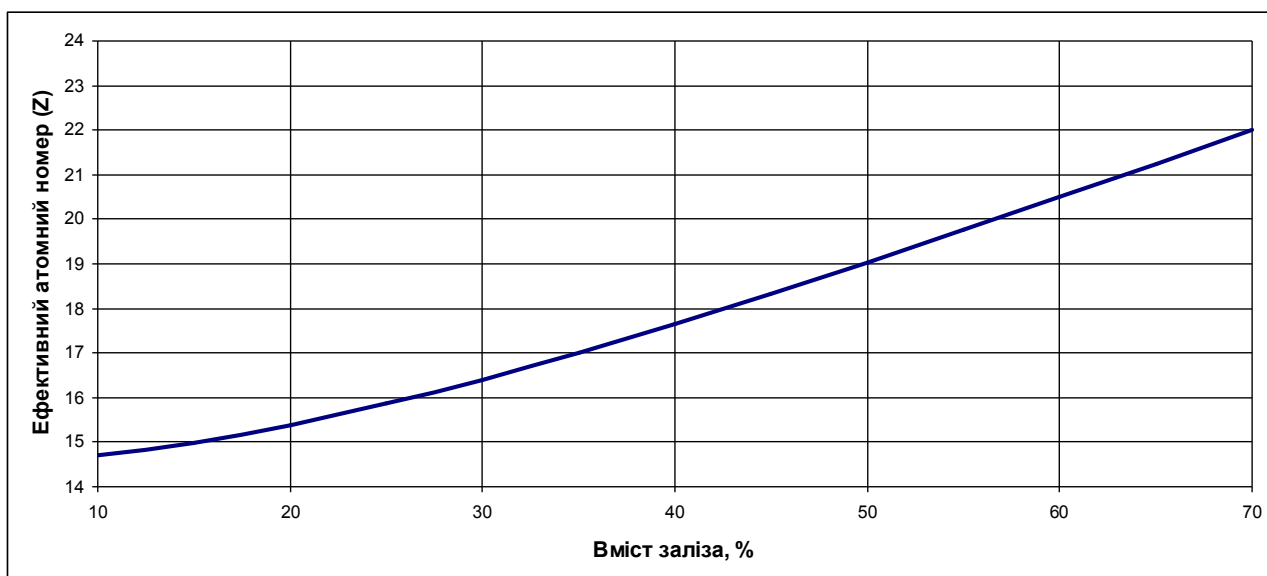


Рис. 4.2 Графік залежності ефективного атомного номеру від вмісту заліза загального

Таблиця 4.3.

Ефективний атомний номер залізорудної сировини Криворізького басейну (обчислений за аналітичним виразом (4.8))

Fe	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Si	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
Z_{ef}	16.16	17.87	19.3	20.54	21.65	22.65	23.6

З таблиці. 4.3 видно, що приріст Z_{ef} , в діапазоні зміни вмісту заліза в рудах Криворізького басейну від 10 до 70%, складе 0.124 одиниць на один відсоток. Або ж $\Delta Z_{ef}/\Delta q = 0.744$ при $\Delta q = 10\%$. Аналітична залежність має вигляд:

$$Z_{ef} = (-4.388198)q_i^2 + (15.72309)q_i + (14.84486). \quad (4.9)$$

4.3 Дослідження залежності інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання від атомного номеру хімічного елементу

При взаємодії гамма-випромінювання з гірськими породами, залежно від енергії джерела випромінювання, мають місце три основні процеси:

фотоефект, комптонівське розсіювання і утворення пар - протон-електрон. Фотоелектричним поглинанням називається процес, коли гамма-кванти (фотони) передають усю свою енергію якому-небудь електрону в атомі речовини. Роль фотоефекту тим вище, чим нижче енергія джерела випромінювання. Зі збільшенням енергії джерела ($E \geq 300$ кеВ) росте вклад розсіяних гамма-квантів в інтегральний потік вторинного випромінювання. Подальше збільшення енергії джерела випромінювання ($E \geq 1.02$ меВ) призводить до поглинання фотонів (анігіляції). В результаті фотони в електричному полі ядра перетворюються на електрони і позитрони.

Таким чином, процес взаємодії гамма-випромінювання з речовиною, залежно від щільності (об'ємної ваги) речового складу і інших фізико-хімічних властивостей цієї речовини, можна характеризувати трьома коефіцієнтами послаблення: атомним, лінійним і масовим [63].

Атомний коефіцієнт послаблення характеризується вірогідністю поглинання на атом поглиначу у барнах. **Масовий коефіцієнт** (μ_m) послаблення характеризує вірогідність поглинання на грам поглиначу на одиницю площі пучка (1 см^2). **Лінійний коефіцієнт** (μ_l) послаблення дорівнює добутку масового коефіцієнта послаблення та щільності речовини поглиначу і визначається за виразом (4.10), та має розмірність см^{-1} :

$$\mu_l = \mu_m * \rho. \quad (4.10)$$

Лінійний коефіцієнт послаблення характеризує вірогідність поглинання гамма-кванта на сантиметр товщини речовини.

Сумарна вірогідність процесів поглинання і розсіювання, віднесена до одного атома, оцінюється «поперечним перерізом».

На рис. 4.3, рис. 4.4 приведені графіки залежностей перерізу розсіювання гамма-випромінювання (σ_p) і фотопоглинання (τ_{cp}) від атомних номерів хімічних елементів при енергії джерела випромінювання 60 кеВ. Очевидно, що зі збільшенням Z_i збільшуються σ_p і τ_{cp} , проте перерізи фотоефекту змінюється

значно швидше. Коефіцієнти кореляції при цьому складають 0.95 і 0.94 відповідно.

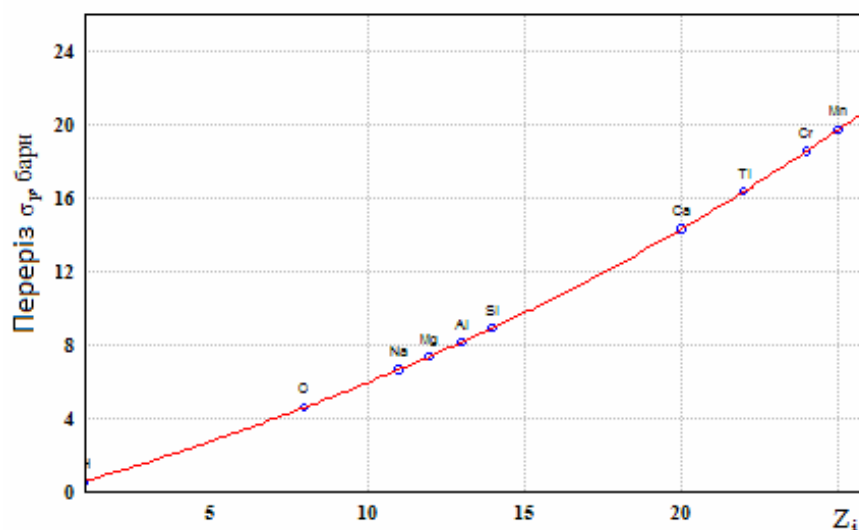


Рис. 4.3 Залежність перерізу розсіяння гамма-випромінювання від атомного номеру хімічного елементу поглинач.

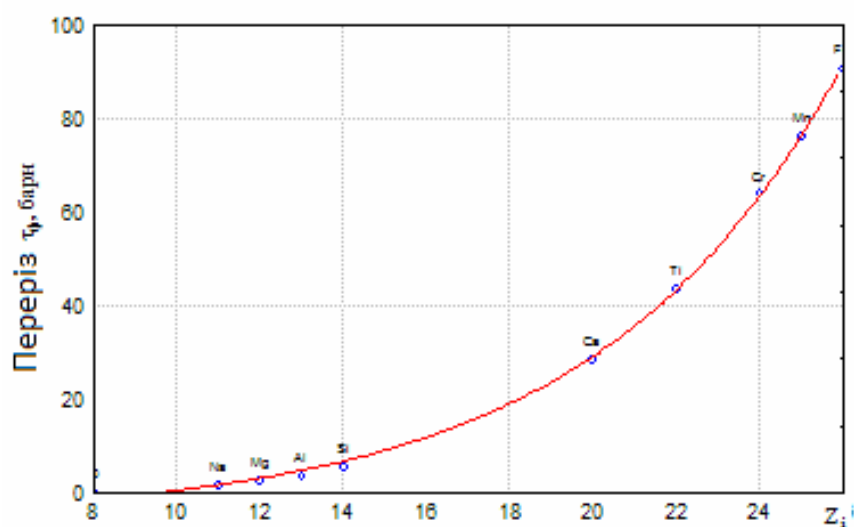


Рис. 4.4 Залежність фотопоглинання від атомного номеру хімічного елементу

Аналітичні вирази залежностей для рис. 4.3, рис. 4.4 мають вигляд

$$\sigma_p = -13.68721 + \exp(2.622422 + (0.03541315)Z_i), \quad (4.11)$$

$$\tau_p = -5.62619 + \exp(0.1225875 + (0.1712206)Z_i). \quad (4.12)$$

На рис. 4.5-рис. 4.7 приведено залежності лінійного (μ_l), масового (μ_m) і атомного (μ_a) коефіцієнтів послаблення від атомного номеру хімічного елементу. З графіків видно, що в усіх трьох випадках є тісна кореляційна залежність. Коефіцієнти кореляції 0.95; 0.93 і 0.94, відповідно.

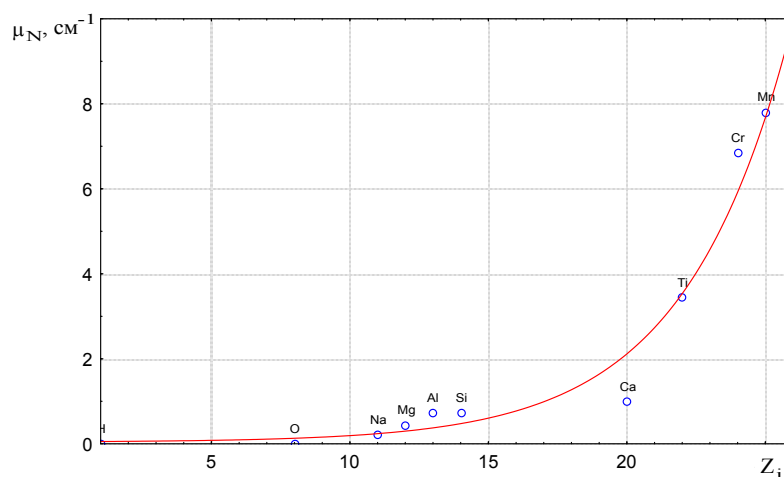


Рис. 4.5 Залежність лінійного коефіцієнта послаблення гамма-випромінювання від атомного номеру хімічного елемента

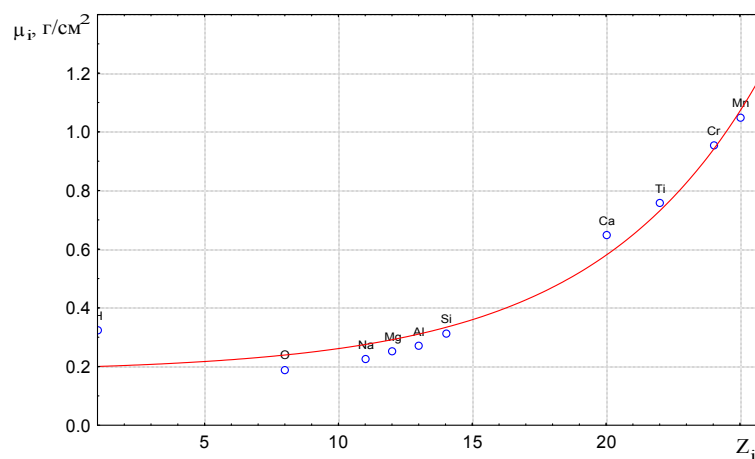


Рис. 4.6 Залежність масового коефіцієнта послаблення гамма-випромінювання від атомного номеру хімічних елементів

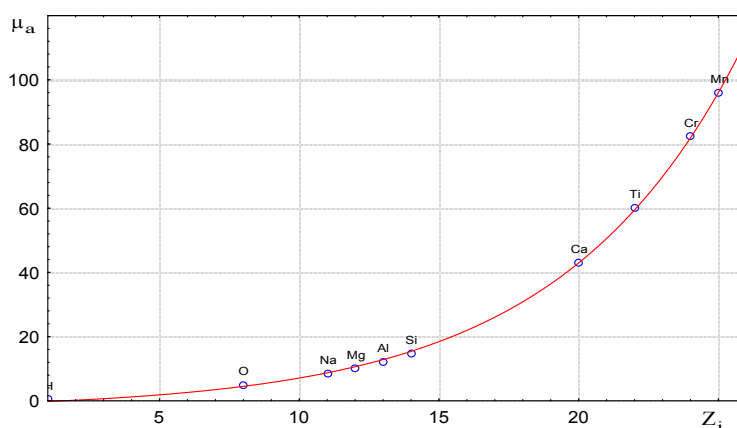


Рис. 4.7 Залежність атомного коефіцієнта послаблення від атомного номеру хімічних елементів

Аналітичні вирази залежностей на рис. 4.5-рис. 4.7 мають вигляд:

$$\mu_l = 0.03928541 + \exp(-4.476949 + (0.26036)Z_i), \quad (4.13)$$

$$\mu_m = 0.1815719 + \exp(-4.136573 + (0.160776)Z_i), \quad (4.14)$$

$$\mu_a = -2.63349 + \exp(0.7317663 + (0.1543944)Z_i), \quad (4.15)$$

Для встановлення придатності гамма-гамма методу для визначення вмісту корисного компонента по стінці свердловини, потрібна чітка межа ефективного атомного номеру для різновиду руд. В цьому випадку доцільно класифікувати різновиди руд на бінарне, квазібінарне і не бінарне середовище з урахуванням застосування гамма-гамма методу.

Залежність інтенсивності випромінювання від ефективного атомного номеру приведена на рис. 4.8, звідки видно, що зі збільшенням Z_{ef} зменшується інтенсивність випромінювання за експоненціальним законом:

$$N = 4618.182 + \exp(10.46505 - 0.1215622)Z_{ef}). \quad (4.16)$$

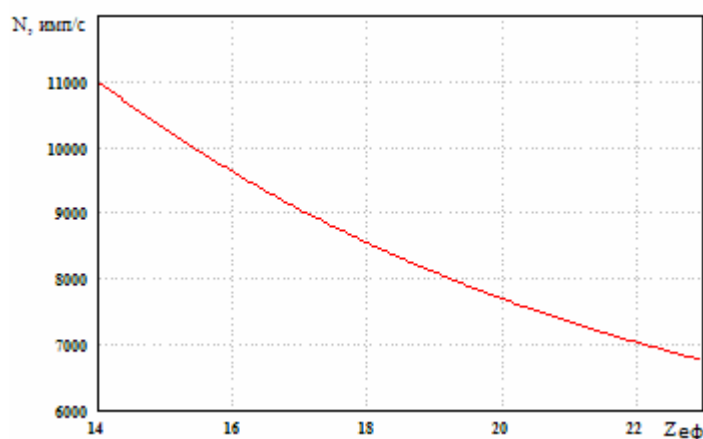


Рис. 4.8 Залежність інтенсивності розсіяного випромінювання від ефективного атомного номеру

Приймаючи що корисний сигнал пропорційно значенню $Z_{\text{ef.проби}}$, а сумарне значення «перешкоди» - $Z_{\text{ef.наповн.}}$ і використовуючи співвідношення цих даних, можна встановити умовні межі бінарного і квазібінарного середовища.

З'ясовано, що якщо $Z_{\text{ef.проби}}$ відрізняється від $Z_{\text{ef.наповн.}}$ хоч би на 10 %, то гамма-гамма метод дозволяє розпізнавати образ (руду) в цій гірській масі.

Отже, для джерела випромінювання Am-241 і при $Z_{\text{ef.проби}}/Z_{\text{ef.наповн.}} = 1.1$ середовище можна вважати квазібінарним. Якщо ж $Z_{\text{ef.проби}}/Z_{\text{ef.наповн.}} \geq 1.2$, то подібне середовище можна віднести до бінарного. При цьому вірогідність розпізнавання образу (руды) становить 95 %.

Таким чином, позначивши $C = Z_{\text{ef.проби}}/Z_{\text{ef.наповн.}}$, можна констатувати, що бінарною називається гірська маса, де $C > 1.2$ і є 95 % вірогідність визначення вмісту корисного компонента з заздалегідь заданою точністю.

Якщо судити за цим критерієм, то, враховуючи нескладний речовинний склад залізних руд Криворізького басейну, їх можна віднести до бінарних середовищ.

4.4 Дослідження впливу щільності, пористості і текстури гірських порід на точність визначення вмісту заліза загального в свердловинах

З фізичних основ селективного гамма-гамма методу (СГГМ) зрозуміло, що на реєстровану величину інтегрального потоку інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання в вибухових свердловинах, крім ефективного атомного номера, впливає щільність досліджуваного середовища (ρ). Якщо цей параметр не буде корелювати з вмістом корисного компонента, то, відповідно його зміни будуть впливати на спотворення кінцевих результатів. В цілому для руд Криворізького басейну характерний високий кореляційний зв'язок між ρ і вмістом $Fe_{заг}$, [36] що є сприятливою передумовою для використання СГГМ.

Дослідження впливу щільності гірських порід і руд на інтегральний потік розсіяного гамма випромінювання проводилося на порошкових зразках. Різну щільність матеріалу отримано шляхом зміни сили пресування. Результати досліджень наведені на рис. 4.9.

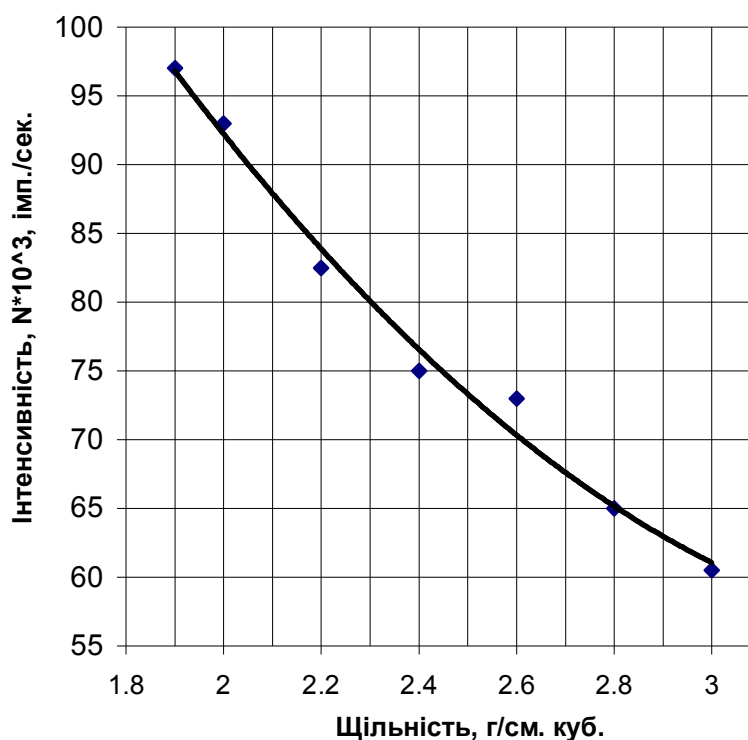


Рис. 4.9 Залежність зміни інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання від щільності гірських порід і руд

Щоб виключити шкідливий вплив цього фактора, вдаються до спеціальних способів конструювання і налагодження зондових пристроїв. Найбільш ефективний спосіб зменшення впливу змінної щільності у відносно великих межах заснований на використанні так званих подвійних інверсійних зондових пристроїв [62]. Суть їх у тому, що вони мають два джерела різної активності Q_1 і Q_2 , розташованих відповідно на відстанях L_1 і L_2 від детектора. Відстані L_1 і L_2 (розмір зонда) забезпечують ефект інверсії. Вони розраховуються виходячи із середньої величини щільності (ρ_{cp}) для випадку контактної геометрії вимірювань ($h_0=0$). Розрахунок проводиться за наближеною формулою:

$$L_{cp} = 1/(\mu_{cp} * \rho_{cp}), \quad (3.17)$$

де μ_{cp} - середня величина масового коефіцієнта ослаблення випромінювання i -го джерела.

Якщо для одного джерела в подвійному зонді $L_1 < L_0$ (доінверсійна зона), а для іншого $L_2 > L_0$ (заінверсійна зона), то для першого джерела величина розсіяного гамма-випромінювання (N) зростає зі збільшенням їх щільності, а для іншого - зменшується.

Таким чином, при одночасному використанні двох джерел, що мають певне співвідношення активності, величини N практично не залежать від щільності середовища, так як вплив щільності компенсується. Для компенсації зміни щільності необхідно також, щоб величини N_1 і N_2 були одного порядку.

У разі точкового джерела і точкового детектора величина N обернено пропорційна L_2 . Тому співвідношення активності джерел повинно вибиратися з умови:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^2 \quad (4.18)$$

Досвід застосування подвійних зондів на родовищах Кривбасу [11] доводить, що з їх допомогою вплив змінної щільності залізних руд можна

компенсувати при вимірюваннях вмісту корисного компоненту у свердловинах.

Так як між щільністю і пористістю є тісний кореляційний зв'язок, то зміна пористості гірських порід і руд рівносильна зміні їх щільності або об'ємної маси. Тому вважається, що зміна пористості при використанні подвійного інверсійного зонду не спотворює величину N .

У природі існує кілька десятків різних найменувань текстур гірських порід і руд, що залежать, в основному, від умов їх утворення (генезису). Для залізних руд Криворізького басейну найбільш характерною є смугаста або шарувата текстура. Залежно від потужності окремих шарів (≥ 0.3 мм) розрізняють тонкошарову і грубошарову текстури.

Слід зазначити, що результати вимірювання при використанні СГГМ багато в чому залежать від орієнтації зондового пристрою щодо направлення шаруватості. Очевидним є те, що коли зонд з вельми обмеженими розмірами прикладати до досліджуваної поверхні (стінці свердловини) паралельно напрямку шаруватості, то результати вимірювання не будуть відображати істинне значення вмісту заліза загального, характерне для певного об'єму гірничого масиву.

4.5 Дослідження впливу «повітряного зазору» між робочою поверхнею зондового пристрою і досліджуваною поверхнею на інтенсивність інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання.

Вибір відстані h між робочою поверхнею зондового пристрою і досліджуваної поверхнею, має особливе значення в методиці розробки приладів визначення речовинного складу.

Пов'язано це з тим, що функція $N = f(h)$ має інверсійний характер аналогічно функції $N = f(\rho)$. Так, якщо зонд, що містить одне джерело випромінювання, віддаляти від досліджуваної поверхні, то функція спочатку буде зростати (доінверсійна зона), а потім, при деякому h , залишається

відносно незмінною (інверсійна зона) і при подальшому збільшенні спостерігається монотонний спад функції (заінверсійна зона) (рис. 4.10). Робоче значення h , відповідно, слід встановлювати на початку інверсійної зони. Однак при використанні пристроїв, де інверсійна зона («плато») становить всього 3...5 мм, є досить чутливим до нерівностей досліджуваної поверхні, що призводить до спотворення кінцевого результату вимірювання [65].

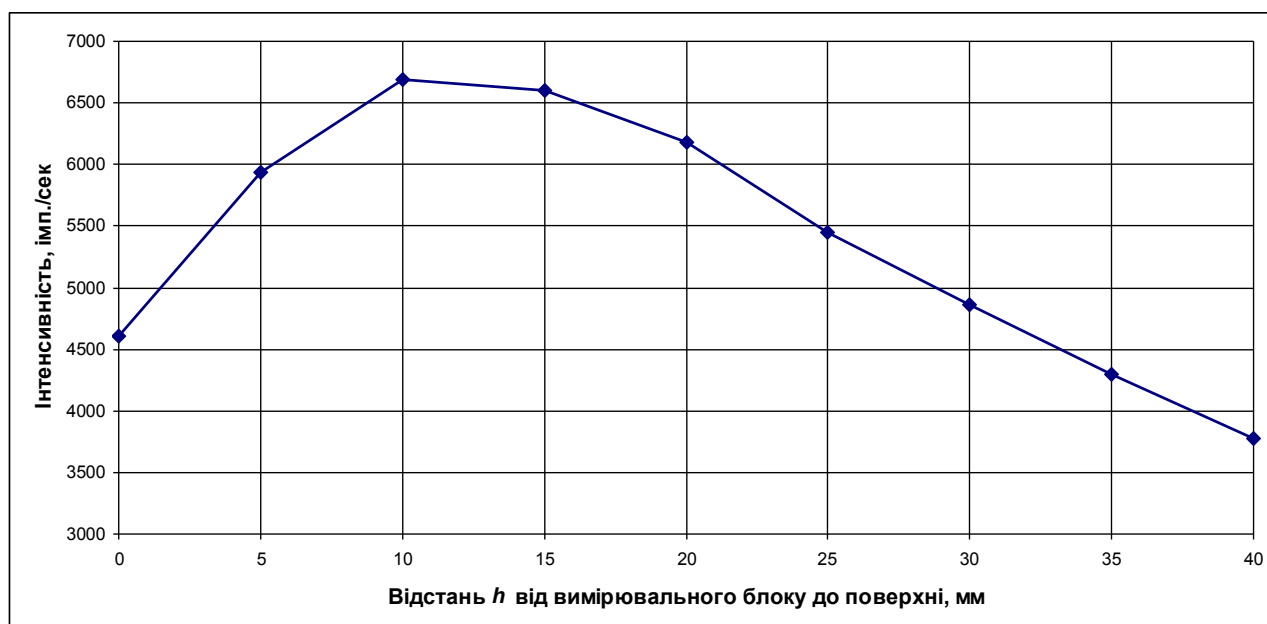


Рис. 4.10 Графік залежності інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання від відстані до об'єкта вимірювання h .

Вплив цього фактора можна зменшити шляхом підбору подвійного інверсійного зонда. В такому зонді використовується два джерела гамма-випромінювання з активностями Q_1 і Q_2 , віддалених на відповідні відстані B_1 і B_2 від детектора. Відстані B_1 і B_2 встановлюються таким чином, щоб джерело Q_1 працювало в доінверсійній зоні, а Q_2 - в заінверсійній. В результаті при знятті характеристики $N = f(h)$ для подвійного зонда (рис. 4.11), інверсійна зона розширюється до 25 ... 40 мм. Це пояснюється тим, що джерела Q_1 і Q_2 як би компенсують випромінювання одне одного.

Такий зонд, дозволяє виконувати вимірювання вмісту корисного компоненту в рудах з відносно нерівною поверхнею, з використанням блоку,

що притискається до поверхні або ж виконувати вимірювання в сухих свердловинах зі змінним діаметром, без притискних пристроїв.

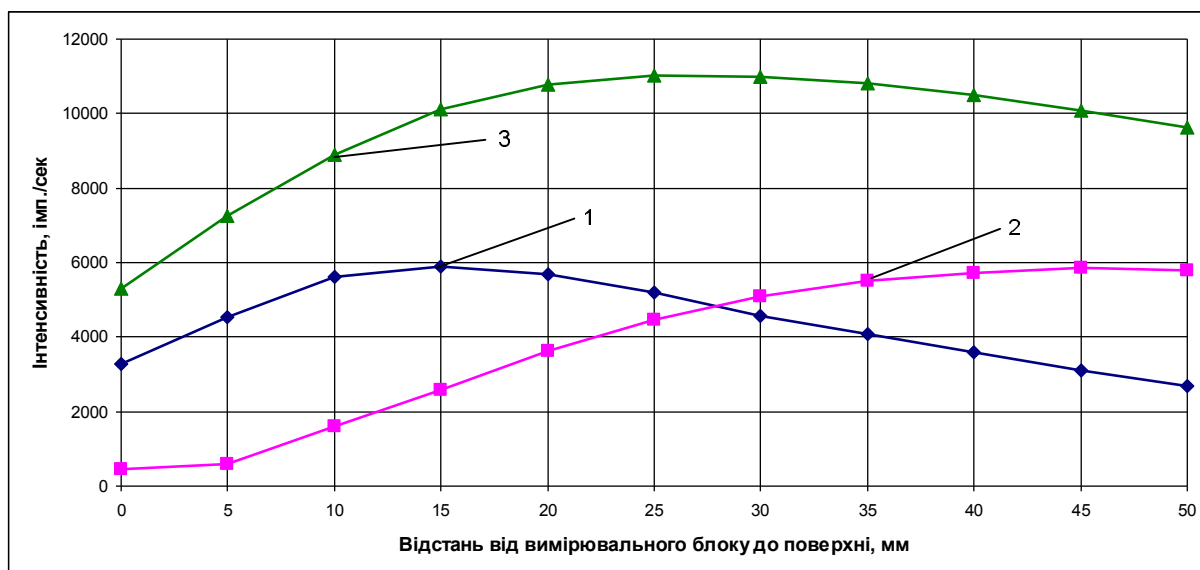


Рис. 4.11 Графік залежності $N = f(h)$ (джерела Am-241):
 1 – $B_1 = 40$ мм, $Q_1 = 1.85 \cdot 10^8$ Бк; 2 – $B_2 = 70$ мм $Q_2 = 1.3 \cdot 10^9$ Бк;
 3 – подвійний зонд, з Q_1 та Q_2

4.6 Дослідження впливу вологості гірської породи

Істотним чинником, що впливає на достовірність визначення вмісту заліза гамма-гамма методом, є природна вологість гірських порід. За статистичними даними багаті м'які руди Криворізького басейну можуть містити до 12 % H_2O , вологість же основних твердих різновидів руд коливається в межах від 2 до 8 % [11].

Будь-яке збільшення вологості від W_0 до W тягне за собою підвищення їх щільності в $(1 + W - W_0)$ раз і в стільки ж разів, як би зменшується, вміст корисного компонента. Пов'язано це з тим, що відбувається перерозподіл процесів взаємодії гамма-квантів з досліджуваним середовищем (для комптонівського розсіювання збільшується, а для фотоефекту зменшується, так як зменшується величина Z_{ef}).

Величина ефективного атомного номера середовища (Z_{ef}), вологість якого змінилася на $(W-W_0)$, аналітично можна визначити за виразом:

$$Z_{ef}(W) = \frac{1}{\sqrt{1+W-W_0}} \sqrt{Z_{ef}^3(W_0) + (W-W_0) \cdot Z_{ef}(H_2O)}, \quad (4.19)$$

де $Z_{ef}(W_0)$ - ефективний атомний номера середовища з початковою вологістю W_0 .

В табл. 4.4 наводяться результати обчислення Z_{ef} за виразом (4.19) для залізної руди різної щільності і вологості.

Таблиця 4.4

Вплив вологості на властивості гірської породи та визначення вмісту $Fe_{заг.}$

гамма-гамма методом

$W, \%$	$\rho, \text{г/см}^3$	Z_{ef}	$Fe_{заг}(Z_{ef}), \%$	$Fe_{заг}(W), \%$
0	3.50	22.4	52.5	52.5
2	3.57	21.3	51.5	51.5
5	3.68	21.1	49.8	50.0
10	3.85	20.8	47.2	47.8
15	4.03	20.5	44.6	45.6
20	4.20	20.2	42.0	43.8

Як видно з таблиці, збільшення вологості на 10 % призводить до зменшення Z_{ef} досліджуваної середовища на 0.6 од. Відповідно зменшується вміст $Fe_{заг.}$ приблизно на 4.7 %. Зіставлення граф $Fe_{заг}(Z_{ef})$ і $Fe_{заг}(W)$ показує, однак, що зменшення Z_{ef} обумовлено зниженням вмісту $Fe_{заг.}$ за рахунок зростання її вологості.

При зміні вологості від 2 до 10 % зниження вмісту заліза загального за даними експериментальних робіт становить 2,5 %, а за даними теоретичних розрахунків по формулі (4.19) - 4,3 %. Статистичний аналіз показує, що близько 90 % руд Криворізького басейну мають вологість від 2 до 6 % [66].

Вплив вологості на результати визначення вмісту заліза ($Fe_{заг.}$) гамма-гамма методом за даними експериментальних робіт наведено на рис. 4.12.

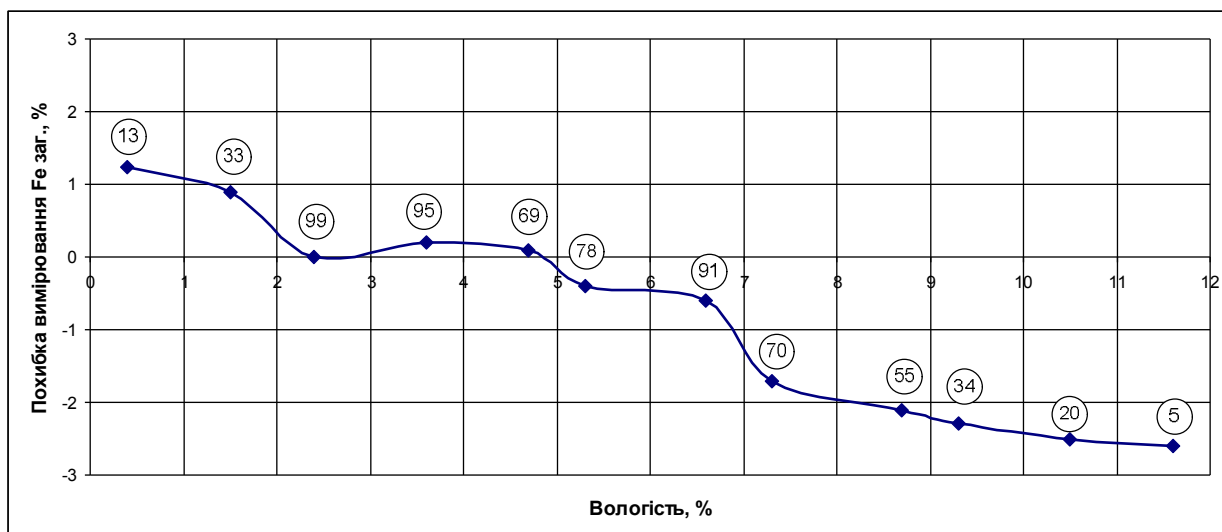


Рис. 4.12 Залежність точності вимірювання вмісту $Fe_{\text{заг.}}$ від вологості матеріалу

⑦⑧ - кількість виконаних вимірювань, в даному прикладі 78.

Як видно з рис 4.11, зміна вологості гірських порід і руд в діапазоні 2-7 % знаходяться в межах точності гамма-гамма методу, що не вимагає введення поправок на вологість. А отже вплив вологи нівелюється.

Висновки по розділу

1. Характеристика речовинного складу за допомогою ефективного атомного номеру, дала змогу оцінити величину похибки, яка становить 0,744% заліза при зміні $Z_{\text{еф}}$ на одиницю.
2. Дослідження залежності інтенсивності випромінювання від ефективного атомного номеру дало змогу стверджувати, що зі збільшенням $Z_{\text{еф}}$ зменшується інтенсивність випромінювання за експоненціальним законом (4.16)
3. Дослідження впливу щільності на інтегральний потік розсіяного випромінювання показало обернено пропорційну залежність, пояснюється це

фізичними властивостями залізних руд, в яких корисний компонент має більшу об'ємну вагу, ніж вміщуючі породи.

4. Характер впливу повітряного зазору можна розділити на 3 зони: доінверсійну (інтенсивність зі збільшенням відстані зростає), інверсійну (інтенсивність при зміні відстані майже не змінна) та за інверсійну, (зниження інтенсивності зі збільшенням відстані);

5. Дослідження впливу вологості в діапазоні природного вмісту води від 2 до 7 % знаходиться в межах точності гамма-гамма методу.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА ЗААСОБІВ СИНХРОННОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

5.1 Узагальнена ідея розробки комбінованого пристрою контролю якості залізорудної сировини

Ідея створення свердловинного пристрою, що містить два датчики контролю якості, призначених для синхронного (одночасного) вимірювання відсоткового вмісту заліза загального ($Fe_{заг}$) і заліза магнетитового ($Fe_{магн}$) в гірській породі по стінці вибухових свердловин.

Вміст $Fe_{заг}$ визначається селективним гамма-гамма методом, виміром інтенсивності N інтегрального потоку гамма-випромінювання, розсіяного аналізованою гірською породою при опроміненні її джерелом гамма-випромінювання (Am-241, з енергією, $E \approx 60$ кеВ) (канал гамма-гамма методу) на основі отриманої заздалегідь градуювальної залежності:

$$Fe_{заг} = f_1(N) \quad (5.1)$$

Дана залежність (5.1) має обернено пропорційний характер: чим вищий вміст заліза в породі, тим більше поглинання гамма-випромінювання, і відповідно, менше інтенсивність розсіяного випромінювання [67].

Вміст $Fe_{магн}$ визначається магнітометричним методом шляхом реєстрації величини ефективної магнітної сприйнятливості (SX) аналізованої гірської породи (канал магнітометричного методу) на основі отриманої заздалегідь градуювальної залежності:

$$Fe_{магн} = f_2(SX) \quad (5.2)$$

Дана залежність (5.2) близька до прямої та прямо пропорційна: чим вищий вміст магнетиту в породі, тим вище її здатність намагнічуватися під впливом зовнішнього магнітного поля, тобто вище величина її магнітної сприйнятливості (магнітної проникності) [68].

Відмітною особливістю комбінованого свердловинного пристрою, є використання в ньому, в якості джерела первинного гамма-випромінювання радіонукліда Америцій-241 (Am-241, з періодом напіврозпаду $T=458$ років) з енергією гамма-квантів $E \approx 60$ кеВ. В якості складових частин сцинтиляційного лічильника використовуються монокристал NaJ(Tl) ($\varnothing 25 \times 30$) і фотоелектричний помножувач ФЕП-85.

В той же час, в свердловинному пристрої станції «Кар'єр-1» використовується радіонуклід Кобальт-57 (Co-57) з енергією гамма-квантів 120 кеВ і періодом напіврозпаду $T=270$ днів. Чутливими елементами застосовуються монокристал NaJ(Tl) ($\varnothing 11 \times 30$ мм) і фотоелектронний помножувач ФЕП-31. У станції «Кар'єр-1», у зв'язку з малим періодом напіврозпаду радіонукліда Co-57, необхідно періодично коригувати результати виміру вмісту заліза, що створює певні труднощі його застосування і вносить додаткову похибку в вимірювання [69].

Конструкція комбінованого свердловинного пристрою повинна містити механізм, що буде забезпечувати притискання двоканального виносного блоку до стінки свердловини, чим повинна забезпечуватися необхідна (контактна) геометрія зони вимірювання для обох каналів.

Виносний блок містить датчик селективного гамма-гамма каналу, та датчик магнітометричного каналу, розміщені на одній осі. А отже під час підйому свердловинного пристрою аналізована поверхня вибухової свердловини спочатку потраплятиме в вимірювальну зону селективного гамма-гамма каналу, а потім магнітометричного каналу. Конструктивне розміщення датчиків в виносному блоці, та інтервал опитування результатів вимірів повинен бути рівний відстані між центрами зон вимірювання, чим забезпечується контроль ідентичних об'ємів гірничої маси обома каналами [70, 71].

5.2 Дослідження залежності вмісту заліза загального від вмісту заліза магнетитового

Для встановлення статистичних залежностей між вмістом заліза загального та заліза магнетитового були досліджені результати фазового аналізу 402 проб другого залізистого горизонту родовища Велика Глеюватка (Додаток Б). Проби представлені двома природними різновидами: силікат-магнетитовими і карбонат-силікат-магнетитовими залізистими кварцитами продуктивної товщі. Оскільки справжні значення параметрів розподілу невідомі, то для того, щоб врахувати невизначеність, що виникає як наслідок застосування статистичних оцінок, побудованих за вибіркою, необхідно використовувати розподіл з більш широкої області значень, ніж у нормального розподілу. Один з розподілів такого типу називається t -розподілом Стюдента. Воно схоже на нормальне, але залежить від обсягу взятої вибірки. Для того, щоб визначити параметри розподілу загального і магнетитового заліза, потрібно за вибірковими даними оцінити параметри вибірки. Для цього вводиться величина, звана числом ступенів свободи, яка визначається як різниця між числом спостережень в вибірці і числом параметрів, які потрібно оцінити за вибірковими даними. Тобто введемо величину перевищення числа спостережень над числом оцінюваних параметрів розподілу [72-74].

Виходячи з цього число ступенів свободи $\nu = 402$, $Z = 400$.

Рівень значущості для оцінки розподілу приймаємо рівним $\alpha = 95\%$. Вибір такого значення рівня значущості пов'язаний з тим, що розподіл вмісту заліза загального та магнетитового в докембрійських залізисто-кременистих формаціях обумовлений багатьма причинами - факторами, які неможливо врахувати при моделюванні. Тому, якщо вибрати більш суворий рівень значущості, то велика ймовірність того, що нульову гіпотезу ніколи не відкинути і виникне необхідність у все більшій кількості даних, які неможливо отримати емпіричним шляхом. Вибираючи ж більш низькі рівні

значущості, можна швидше прийти до висновку, однак при цьому збільшується ймовірність помилки оцінки вмісту заліза магнетитового по залізу загальному. Тому обрана величина рівня значущості лежить на кордоні області «ризиків».

Для перевірки закону розподілу обчислювалися такі показники: \bar{x} - середнє арифметичне значення

$$Fe_{заг} = 1/n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 34.71, \quad (5.1)$$

$$Fe_{магн} = 1/n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 26.16. \quad (5.2)$$

S_x^2 - оцінка дисперсії:
для заліза загального

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 18.4, \quad (5.3)$$

для заліза, магнетитового

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 53.57. \quad (5.4)$$

S_x - середньоквадратичне стандартне відхилення (стандарт):
для заліза загального

$$S_x = \sqrt{S_x^2} = 4.29, \quad (5.5)$$

для заліза, магнетитового

$$S_x = \sqrt{S_x^2} = 7.32. \quad (5.6)$$

По кожному досліджуваному показнику будувалися гістограми і перевірялося відповідність вибіркового розподілу нормальному теоретичному розподілу.

Для цієї мети обчислювалися оцінки асиметрії - A :
для заліза загального

$$A = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{nS_x^3} = -0.127, \quad (5.7)$$

для заліза, магнетитового

$$A = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{nS_x^3} = 0.086 \quad (5.8)$$

і ексцесу E:

для заліза загального

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{nS_x^4} - 3 = 0.268, \quad (5.9)$$

для заліза, магнетитового

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{nS_x^4} - 3 = -0.124. \quad (5.10)$$

Статистичні параметри розподілу заліза загального та заліза магнетитового родовища Велика Глеюватка наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Статистичні параметри розподілу загального і магнетитового заліза родовища Велика Глеюватка

Статистичні показники	$Fe_{заг}$	$Fe_{магн}$
кількість проб	402	402
середнє	34.71	26.16
медіана	34.95	26.43
мінімум	20.9	9.15
максимум	45.8	44.56
дисперсія	18.43	53.56
Стандартне середньоквадратичне відхилення	4.29	7.319
асиметрія	-0.127	0.0865
Стандартне відхилення асиметрії	0.122	0.122
ексцес	0.268	-0.124
Стандартне відхилення ексцесу	0.24	0.24

Гістограма вмісту заліза загального зображена на рис. 5.1. Гістограма вмісту заліза магнетитового приведена на рис. 5.2.

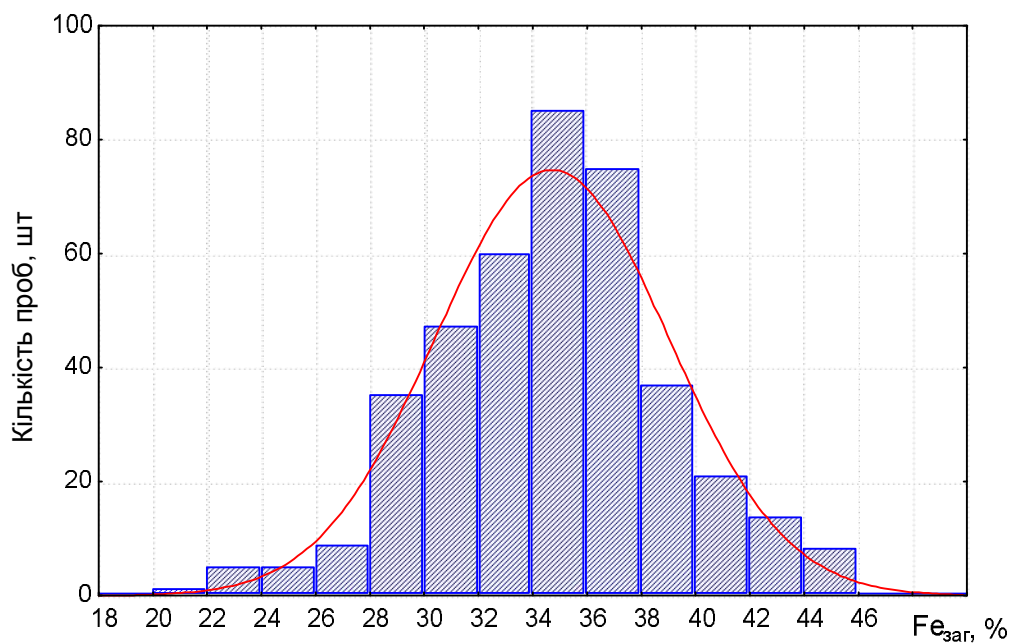


Рис. 5.1 Розподіл вмісту заліза загального родовища Велика Глеюватка (другий залізистий горизонт).

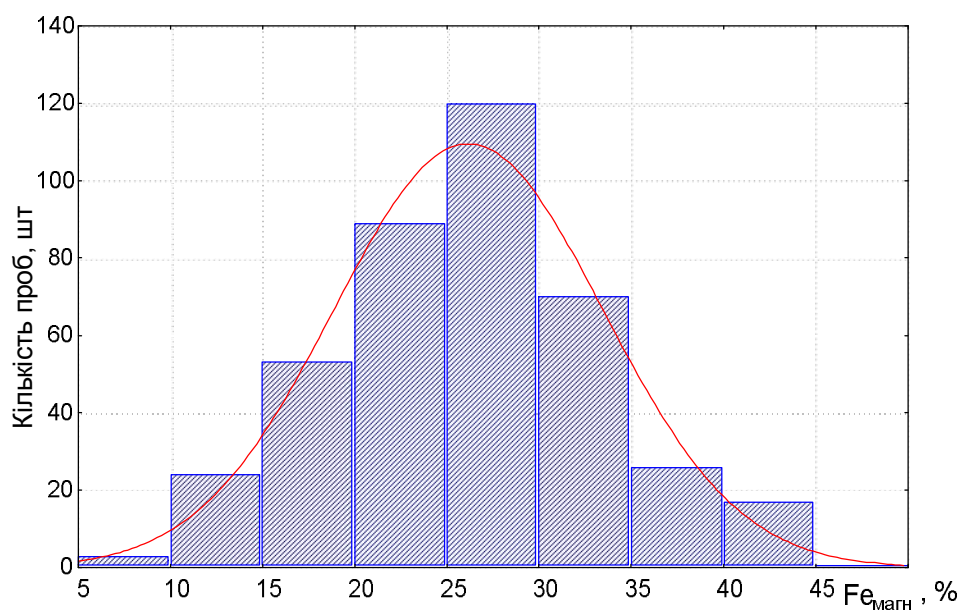


Рис. 5.2 Розподіл вмісту заліза магнетитового родовища Велика Глеюватка (другий залізистий горизонт).

Потім оцінювалася істотність їх відмінності від нуля. Якщо

$$t_a = \frac{|A|}{\sqrt{6/n}} < 3 \quad (5.11)$$

та

$$t_E = \frac{|E|}{\sqrt{24/n}} < 3, \quad (5.12)$$

то вибірковий розподіл несуттєво відрізняється від нормального розподілу. Якщо $t_a > 3$ і (або) $t_E > 3$, то розбіжність теоретичного і вибіркового розподілів слід вважати істотним.

Попередньо обчислені значення цього критерію для загального і магнетитового заліза рівні відповідно для асиметрії 0.121 і 0.08, для ексцесу 0.243 і 0.242. Отже, як розподіл заліза загального, так і розподіл заліза магнетитового в другому залізістому горизонті родовища Велика Глеюватка не суперечать гіпотезі про нормальний розподіл [75, 76].

Оцінка залежності вмісту заліза магнетитового від вмісту заліза загального. Для оцінки ступеня взаємної зв'язку між вмістом заліза магнетитового і загального використовувався коефіцієнт кореляції r , який являє собою відношення коваріації заліза загального та магнетитового до добутку їх стандартних відхилень.

$$r_{Fe_{\text{магн}}, Fe_{\text{заг}}} = \text{COV}_{Fe_{\text{магн}}, Fe_{\text{заг}}} (S_{Fe_{\text{магн}}} S_{Fe_{\text{заг}}}) . \quad (5.13)$$

Так як коефіцієнт кореляції є відношенням, то ця величина безрозмірна. При цьому коваріація може дорівнювати величині визначених стандартних відхилень заліза загального та магнетитового, але не може перевищувати її. Тому коефіцієнт кореляції приймає значення від -1 до +1. Якщо коефіцієнт кореляції дорівнює +1, то це вказує на прямий лінійний зв'язок між двома змінними. Якщо ж коефіцієнт кореляції дорівнює -1, то це означає, що одна змінна змінюється в протилежному напрямку по відношенню до іншої. Між двома крайніми випадками знаходиться спектр

менш сильних зв'язків, що включають рівність коефіцієнта кореляції нулю, що вказує на повну відсутність будь-якого типу лінійних залежностей.

Вибіркова оцінка коефіцієнта кореляції обчислюється за формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)S_x S_y} = \frac{S_{yx}}{S_x S_y}, \quad (5.14)$$

де $S_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ - коваріація загального і магнітного заліза;

x_i - вміст заліза загального;

y_i - вміст заліза пов'язаного з магнетитом;

\bar{x}, \bar{y} - середні значення заліза загального та зв'язаного з магнетитом;

S_x, S_y - стандартні відхилення заліза загального та зв'язаного з магнетитом.

Обчислення значення коефіцієнта кореляції $r = 0.948$.

Вибірковий коефіцієнт кореляції як випадкова величина оцінюється за допомогою критерію

$$t_r = \frac{|r_{xy}| \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} = \frac{0.948 \sqrt{402-2}}{\sqrt{1-0.948^2}} = 57.98, \quad (5.15)$$

який розподілений нормально по закону Стюдента з $\gamma=n-2$ ступенями свободи. Обчислення значення критерію значно перевищує критичне значення $t_{кр} = 1.97$, прийняте за таблицями t -розподілу Стюдента. Отже, залежність між вмістом заліза магнетитового і загального значна. Критичне значення t_α - знаходиться в таблицях розподілу Стюдента з даним рівнем значущості $\alpha = 0.05$ і $\gamma=n-2=402-2$ ступенями свободи.

Для перевірки гіпотези про рівність дисперсій загального і магнітного заліза використовувався критерій Фішера. Це теоретичний розподіл відносини $F = S_{21} / S_2^2 = 53.569 / 18.4337 = 2.9$ двох вибірових дисперсій для вибірок, взятих з нормальних сукупностей за умови, що істинні дисперсії

рівні. При цьому в чисельнику знаходиться більша вибіркова дисперсія, а в знаменнику - менша.

Ступені свободи $\nu_1 = \nu_2 = n - 1 = 402 - 1 = 401$. Критичне значення критерію Фішера F з 401 ступенем свободи і рівнем значущості $\alpha = 0.05$ дорівнює 1 (таблиці F -розподілу). Оскільки $F = 2.9 > F_{кр} = 1$, то нульова гіпотеза відкидається, приходимо до висновку, що дисперсії вмісту заліза загального та магнетитового можна вважати не однаковими (рис. 5.3).

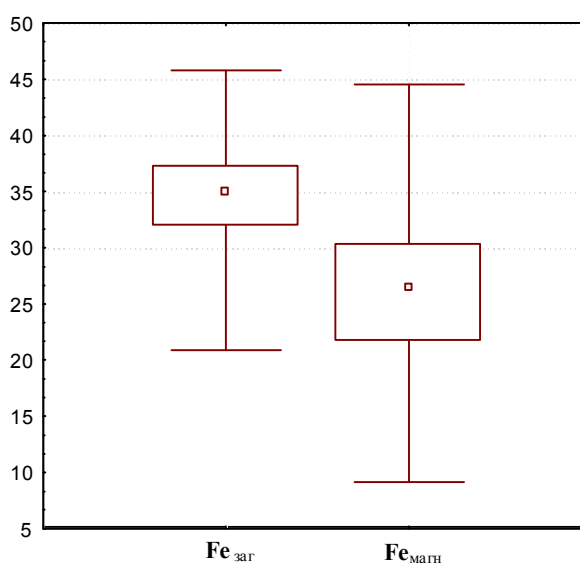


Рис. 5.3 Діаграма вмісту заліза загального і заліза магнетитового родовища Велика Глеюватка

Отриманий результат свідчить, що мінливість вмісту заліза загального в другому залістистому горизонті родовища Велика Глеюватка можна визначити за мінливістю заліза магнетитового. Оскільки був виявлений тісний кореляційний зв'язок між вмістом заліза загального та заліза магнетитового, отже наступним кроком статистичного аналізу є з'ясування конкретного виду залежності між цими двома показниками, тобто рівняння регресії (рис. 5.4):

$$Fe_{\text{магн}} = a + bFe_{\text{заг}}, \quad (5.16)$$

де a - вільний член рівняння регресії;

b - коефіцієнт регресії.

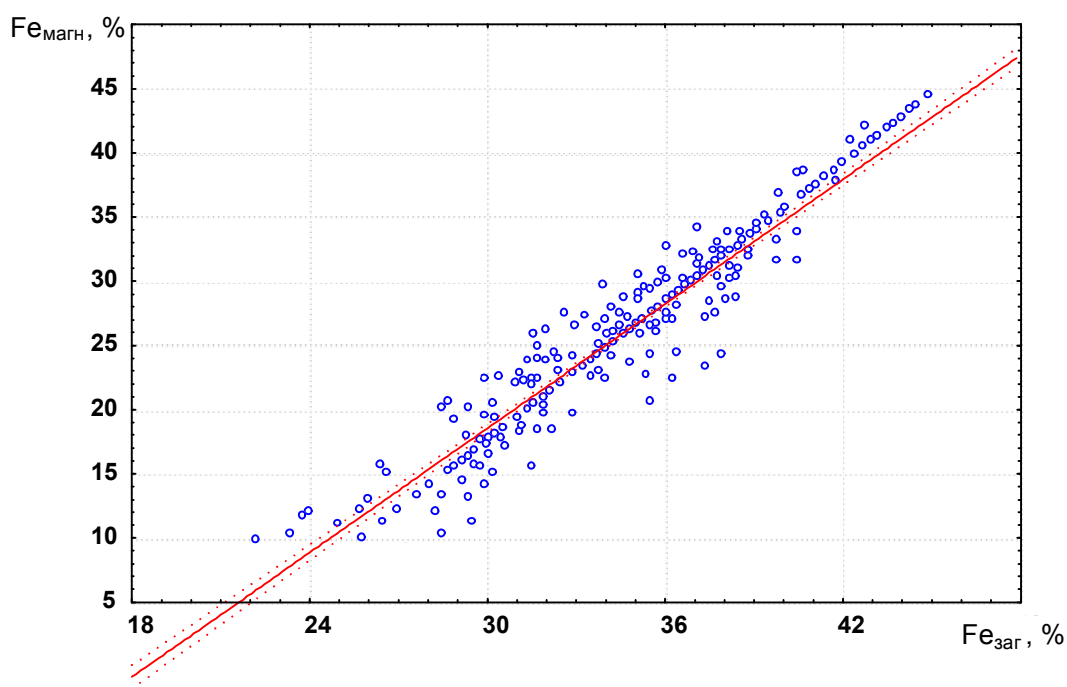


Рис. 5.4 Залежність $Fe_{\text{магн}}$ від $Fe_{\text{заг}}$ родовища Велика Глеюватка. (другий залістий горизонт).

За вибірковими даними обчислюються оцінки «а» і «b» коефіцієнтів a і b . Обчислення проводяться за формулами

$$b = rS_{Fe_{\text{магн}}} / S_{Fe_{\text{заг}}} = 0.948 \cdot 7.31 / 4.29 = 1.6161, \quad (5.17)$$

$$a = Fe_{\text{магн}} - bFe_{\text{заг}} = 26.16 - 1.6161 \cdot 34.71 = -29.94. \quad (5.18)$$

Таким чином, отримуємо рівняння регресії (залежності вмісту заліза магнетитового від вмісту заліза загального):

$$Fe_{\text{магн}} = -29.94 + 1.6161 Fe_{\text{заг}}. \quad (5.19)$$

Коефіцієнт кореляції при цьому: $r = 0.95$

Отримані значення a і b є випадковими величинами і тому піддаються статистичній оцінці.

Стандартні відхилення цих величин розраховуються за формулами:

$$S_a = \frac{S_{Fe_{\text{магн}}} \sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n-2}} = \frac{7.32 \sqrt{1-0.948^2}}{\sqrt{402-2}} = 0.12, \quad (5.20)$$

$$S_b = \frac{S_{Fe_{\text{магн}}} \sqrt{1-r_2}}{S_{Fe_{\text{заг}}} \sqrt{n-2}} = \frac{7.32 \sqrt{1-0.948^2}}{4.29 \sqrt{402-2}} = 0.027. \quad (5.21)$$

Суттєвість відмінностей «а» від нуля і «b» від одиниці оцінюється за допомогою критеріїв:

$$t_a = a / S_a = -29.94 / 0.12 = -249.5, \quad (5.22)$$

$$t_b = \frac{b-1}{S_b} = \frac{1.6161-1}{0.027} = 22.8. \quad (5.23)$$

Обидва критерії розподілені за законом Стюдента з $\gamma=n-2=402-2=400$ ступенями свободи. Критичне значення критерію Стюдента при п'яти-відсотковому рівні значущості 1.96, що значно нижче розрахованих статистик. Отже, «а» істотно відрізняється від нуля, а «b» істотно відрізняється від одиниці.

Таким чином, в результаті статистичної обробки даних отримана залежність, за допомогою якої можна прогнозувати вміст заліза магнетитового за даними вмісту загального заліза. Виведена залежність може бути використана для силікат-магнетитових і карбонат-силікат-магнетитових кварцитів криворізької серії [73].

Внаслідок статистичної обробки даних отримана залежність, за допомогою якої можна прогнозувати вміст магнітного заліза за даними вмісту загального заліза. Отримана залежність може бути використана для силікат-магнетитових і карбонат-силікат-магнетитових кварцитів Криворізької серії.

5.3. Розробка методів синхронного каротажу сухих і обводнених свердловинах

Як свідчать експериментальні роботи [11], зі збільшенням прошарку води до 15 см інтегральний потік розсіяного гамма-випромінювання N_p зростає, після чого настає насичення і пристрій реєструє тільки гамма-кванти розсіяні у воді. При цьому встановлено, що при зміні відстані між притиснутим до стінки виносним блоком і стінкою свердловини h до 3 мм відповідно вплив води не перевищує 1 %, а надалі зростає до 3 % при $h=6$ мм і до 6 % при $h=10$ мм. В заінверсійній зоні залежність $N_p=f(h)$ залежить від зростання інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання N_p від прошарку води, що істотно компенсується зменшенням N_p зі збільшенням h , внаслідок чого сумарне значення N_p змінюється плавно [11].

Дослідження кавернозності стінок вибухових свердловин показує, що найбільш вірогідна зміна відстані між притиснутим до поверхні свердловини виносним блоком і стінкою свердловини (h) складає 1.5 мм, що знаходиться в зоні найменшого впливу відповідного шару води і h на значення інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання N_p .

Слід зазначити, що свердловини, які буряться шарошкою з промиванням, часто руйнують руди і гірські породи, що різко відрізняються за фізичними властивостями і фізичним станом (рихлі, тріщинуваті і тому подібне). Це обумовлює надмірну кавернозність та вивали порід. В цьому випадку завдяки своїй довжині виносний блок не в змозі в точності описати рельєф поверхні і, як наслідок, шар води досягає критичних значень, що виходять за межі глибинності селективного гамма-гамма методу (ГГМС). При цьому інтегральний потік розсіяного гамма-випромінювання N_p набуває неправдивих значень, що призводять до значних похибок визначення вмісту, заліза загального. Завдяки наявності каверн та нерівностей поверхні, в електромагнітне поле вимірювальної котушки індуктивного датчика

потрапляє менше досліджуваного матеріалу, що підвищує похибку вимірювання вмісту заліза магнітного.

Попри те, що щільність (об'ємна маса) зразків залізних руд має досить тісний зв'язок з вмістом заліза загального, в природному заляганні вона може бути порушена впливом води або механічного руйнування досліджуваних пластів (ділянок) під час буріння свердловини. Наприклад, наявність водяного бурового розчину у свердловині істотно змінює умови вимірів, впливаючи на фізичний стан ближнього до зондового пристрою вимірюваного шару, у зв'язку з його підвищеною пористістю або тріщинуватістю. При цьому слід враховувати, що глибинність дослідження гамма-гамма методом складає близько 40-50 мм, тоді як в шарошкових свердловинах діаметром 250-300 мм можуть утворюватися каверни глибиною понад 100 мм. Очевидно, що заповнення таких каверн водою приведе до різкого спотворення результатів вимірювання, тобто порушить достовірність кількісних показників корисного компонента. У даному випадку положення посилюється ще і тим, що каверна, що утворилася, або нерівність іншого виду як би віддаляють досліджувану поверхню від датчика, тобто змінюється геометричний чинник, чим також вноситься похибка в результати вимірів.

Завдання оперативного контролю якості залізорудної сировини у обводнених свердловинах при відкритому видобутку можна вирішити комбінованим методом (технічним і методичним). Суть методу полягає в комплексному використанні комбінованого свердловинного пристрою та методики вимірювання в сухих і обводнених свердловинах [77].

Необхідно використати селективний гамма-гамма метод (ГГКС) з індуктивним датчиком магнітної сприйнятливості так, щоб отримати інформацію про вміст заліза загального і магнітного уздовж циліндричної поверхні стінки свердловини. Це досягається шляхом конструктивного поєднання в одному виносному блоці направленої зонду селективного гамма-гамма методу і зчленованого з ним направленої індуктивного

магнітометричного зонду. Причому обидва ці зонди повинні мати близькі параметри глибинності, і площі вимірювальної поверхні.

У разі каверни (вивалу) обидва зонди зафіксують її наявність зміною вмісту корисних компонентів. При цьому канал гамма-гамма методу зареєструє підвищення вмісту заліза загального завдяки зменшенню зареєстрованої інтенсивності інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання за рахунок збільшення відстані пробігу гамма-квантів. Під час проходження каверни в електромагнітне поле вимірювальної котушки магнітометричного каналу потрапляє менше магнітного матеріалу, а отже канал реєструє зменшення вмісту заліза магнетитового. Отже аналіз характеру зміни вмісту заліза загального та магнетитового, а також наявність встановленого кореляційного зв'язку цих параметрів дозволяє ідентифікувати області свердловини з недостовірними показниками вмісту корисних компонентів, обумовленими впливом каверни, що неможливо виявити використовуючи кожен канал окремо, за рахунок цього досягається синергетичний ефект синхронного методу.

Крім того, комбінований свердловинний пристрій дозволяє досить точно і однозначно розчленувати літологічний розріз, що перетинається свердловиною, виділивши в ньому залізисті кварцити різної міри окисленості, безрудні включення різної потужності і складу, а також контакти рудних пластів з вміщуючими породами [78].

Перший метод визначення корисних компонентів залізорудної сировини в обводнених свердловинах може бути побудована на кореляційній залежності між вмістом заліза загального і заліза пов'язаного з магнетитом (при доведеній наявності такої залежності для досліджуваного різновиду руд). Цей спосіб, доцільно застосовувати в особливо складних гірничотехнічних умовах, коли відомо про інтенсивну тріщинуватість, а, отже, і кавернозність шарошкових свердловин, заповнених водою повністю або частково. Очевидно, що при цьому немає сенсу використовувати дані, отримані селективним гамма-гамма методом, а інформацію про вміст $Fe_{\text{заг.}}$ в обводнених інтервалах, доцільно

отримати непрямым шляхом, за показниками магнітометричного каналу і використовуючи кореляційний зв'язок між $Fe_{\text{заг}}$ і $Fe_{\text{магн}}$.

Другий метод передбачає також використання масштабних коефіцієнтів. Суть методу полягає в визначенні співвідношення інтенсивностей сухої та обводненої свердловини. Для цього:

- здійснюється вимірювання декількох представницьких (еталонних) сухих свердловин по залізу загальному;
- свердловини частково, або повністю, заповнюються водою і проводиться повторне вимірювання по залізу загальному;
- за результатами обробки обчислюються масштабні коефіцієнти для кожного інтервалу квантування по усій глибині свердловини;

Отримання результатів вимірювань по сухих і обводнених свердловинах з урахуванням масштабних коефіцієнтів. При цьому межа переходу з заповненої до сухої визначається різким збільшенням інтенсивності гамма-гамма каналу и незначними змінами по магнітометричному каналу.

Слід зазначити, що метод масштабних коефіцієнтів доцільно застосовувати тільки в тих випадках, коли фізико-хімічні і фізико-механічні властивості досліджуваних гірських порід родовища приблизно однакові.

Третій метод - комплексний. При цьому для вимірювань по обводнених свердловинах, використовується поєднання першого і другого методів. Третій метод використовується в тих випадках, коли на родовищі зустрічаються прошарки нерудних або напівокислених, окислених кварцитів, в яких відсутній чіткий кореляційний зв'язок між вмістом заліза загального і заліза пов'язаного з магнетитом. Порядок вимірювань третього методу обводнених свердловин, полягає в наступному. В процесі вимірювань робиться порівняння в кожній точці контролю вмісту заліза загального, визначеного по кореляційній залежності з залізом пов'язаним з магнетитом, і заліза загального, визначеного по методу масштабних коефіцієнтів. При

цьому в якості критерію оцінки збіжності результатів визначення заліза загального по двох методах використовується наступне співвідношення: $|Fe_{заг1} - Fe_{заг2}| \leq 1.5\%$, де $Fe_{заг1}$ - вміст заліза загального, визначеного першим методом, $Fe_{заг2}$ - вміст заліза загального, визначеного другим методом. При виконанні наведеної вище умови, як результат приймається середньоарифметичне значення двох методів. Інакше набуває значення вміст заліза загального, визначеного другим методом, за умови виконання нерівності: $Fe_{магн}/Fe_{заг2} \leq 0.6$, де $Fe_{магн}$ - вміст заліза пов'язаного з магнетитом [77].

5.4. Розробка алгоритму роботи комбінованого свердловинного пристрою

На рис. 5.5 зображено блок-схему алгоритму синхронного вимірювання заліза загального та заліза пов'язаного з магнетитом в вибухових свердловинах.

Алгоритм роботи пристрою включає 11 блоків. В пам'ять пристрою заздалегідь внесено параметри залежності вмісту заліза магнетитового від магнітної сприйнятливості ($f1$) вмісту заліза загального від інтенсивності інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання ($f2$), вмісту заліза загального від вмісту заліза магнетитового ($f3$), значень масштабних коефіцієнтів k кореляційної залежності ($f4$) зв'язку інтенсивності сухої свердловини, та заповненої водою [77].

В якості початкових даних, бортовий комп'ютер оператора отримує від комбінованого свердловинного пристрою пакет даних, який містить величину інтенсивності інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання N та магнітної сприйнятливості Sx (блок 1).

У блоці 2 відбувається перевірка отриманого значення інтенсивності інтегрального потоку та приймається рішення щодо обводненості інтервала свердловини, де відбувався вимір.

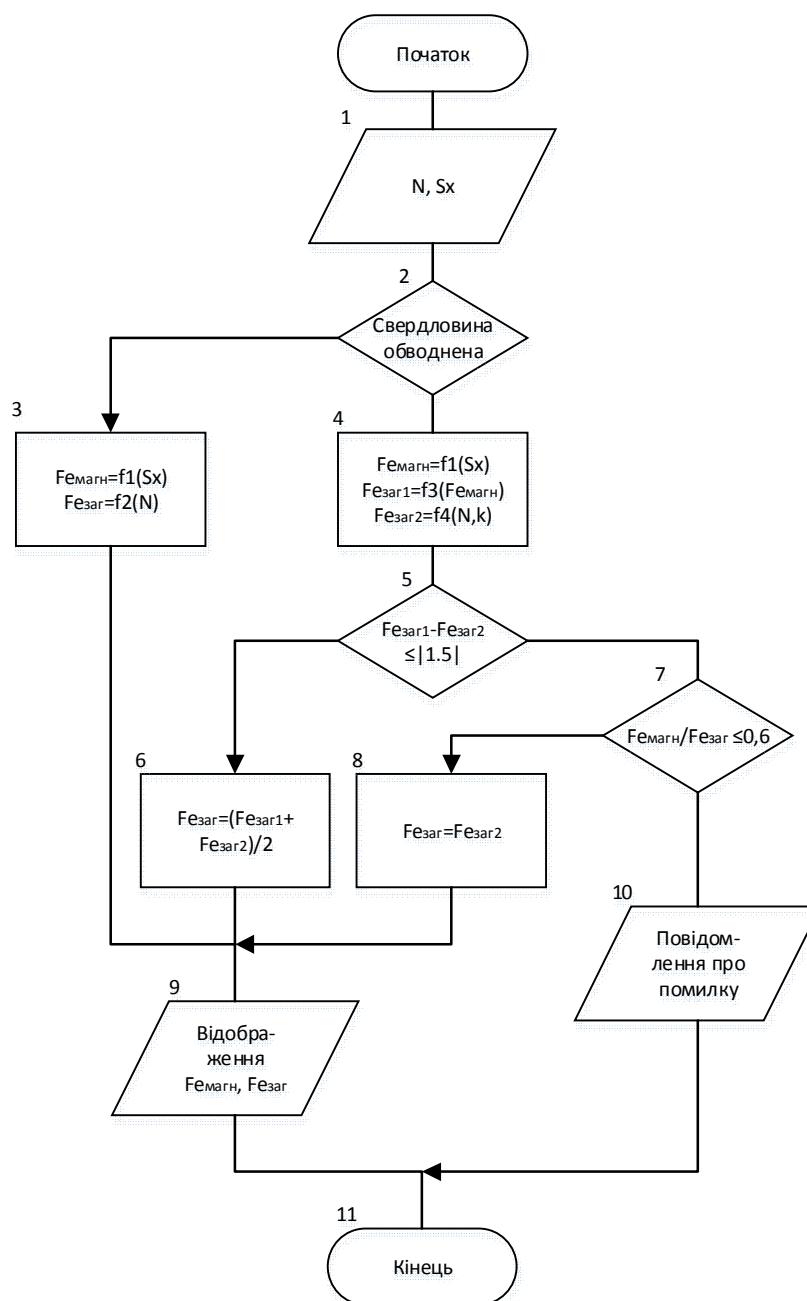


Рис. 5.5 Алгоритм синхронного вимірювання свердловин по Fe_{zag} і Fe_{mag}

Якщо свердловина обводнена, то розрахунок виконується тільки по даним магнітометричного каналу виміру заліза пов'язаного з магнетитом. В результаті на поточному кроці визначається вміст магнітного заліза в цій точці. При цьому вміст загального заліза залежно від фізико-хімічних і фізико-механічних властивостей гірських порід може визначатися двома методами. Використовуючи кореляційну залежність між вмістом заліза загального і заліза пов'язаного з магнетитом, визначається вміст загального заліза в цій же точці. Крім того, вміст загального заліза у свердловинах, які

обводнені, визначається, використовуючи масштабні коефіцієнти (блок 4). При цьому в якості критерію оцінки збіжності результатів визначення заліза загального по двох методах використовується наступне співвідношення (блок 5):

$$Fe_{заг1} - Fe_{заг2} \leq 1.5\%.$$

При виконанні наведеної вище умови як результат приймається середньоарифметичне значення двох методів (блок 6). Інакше (блок 8) набуває значення вміст заліза загального, визначеного методом масштабних коефіцієнтів (блок 7), за умови виконання нерівності : $Fe_{магн}/Fe_{заг2} \leq 0.6$, де $Fe_{магн}$ - вміст заліза пов'язаного з магнетитом. У разі технічних несправностей пристрою це співвідношення не виконується (блок 10) і управління програмою передається до блоку 11.

Якщо ж свердловина суха, то розрахунок вмісту корисних компонентів виконується по двом каналам (блок 2) на цьому інтервалі глибини свердловини.

5.5 Основні технічні вимоги до комбінованого свердловинного пристрою

- Гамма-гамма канал:
 - Програмне регулювання нижнього і верхнього рівнів дискримінації, що дає можливість реєструвати частину спектру реєстрованого гамма-випромінювання
 - Програмне регулювання і стабілізація напруги високовольтного блоку живлення, що дає можливість вибрати оптимальну напругу живлення ФЕП в центрі плато.
 - Програмна температурна корекція сигналу гамма-датчика (інтенсивності інтегрального потоку гамма-випромінювання), що

значною мірою послаблює температурну похибку вимірювань вмісту $Fe_{заг}$.

- Магнітометричний канал:
 - Використання в якості магнітного датчика автогенераторного магнітометричного перетворювача, детально описаного в розділі 2
 - Програмна температурна корекція сигналу магнітного датчика, що в значній мірі знижує температурну похибку вимірювань вмісту $Fe_{магн}$.
- Інтерфейс: цифровий, модифікований RS-232, однопровідний (прийом і передача здійснюється по одному проводу), напівдуплексний. 3-контактний роз'єм на хвостовику свердловинного снаряда (живлення, сигнал RX/TX, земля).
- Протокол обміну: RPG-ModBus, що базується на ModBus RTU
- Напруга живлення зонда: постійна, 8-27 В
- Споживання енергії: не більше 2 Вт

5.6 Розробка апаратної частини

Функціональна схема свердловинного пристрою наведена на рис. 5.6. Основу схеми складає мікроконтролер, який виконує наступні функції:

- вимірювання інтенсивності (тобто кількості імпульсів за певний час вимірювання) по двох каналах (лічильник 1 і лічильник 2) [79];
- тактування процесу вимірювання (точний відлік часу вимірювання);
- вимірювання температури всередині корпусу датчика і розрахунок температурної корекції результатів вимірювання;
- програмно задає величину напруги для живлення ФАПЧ;
- програмно задає рівні дискримінації (нижній і верхній) по двох каналах (лічильник 1 і лічильник 2, відповідно);
- формує тестовий сигнал для перевірки каскаду реєстрації;

- реєструє частоту імпульсів, що надходять від магнітометричного каналу;
- забезпечує обробку команд, що надходять від програмного забезпечення верхнього рівня (протокол Modbus), формування та відправка пакетів даних на верхній рівень.

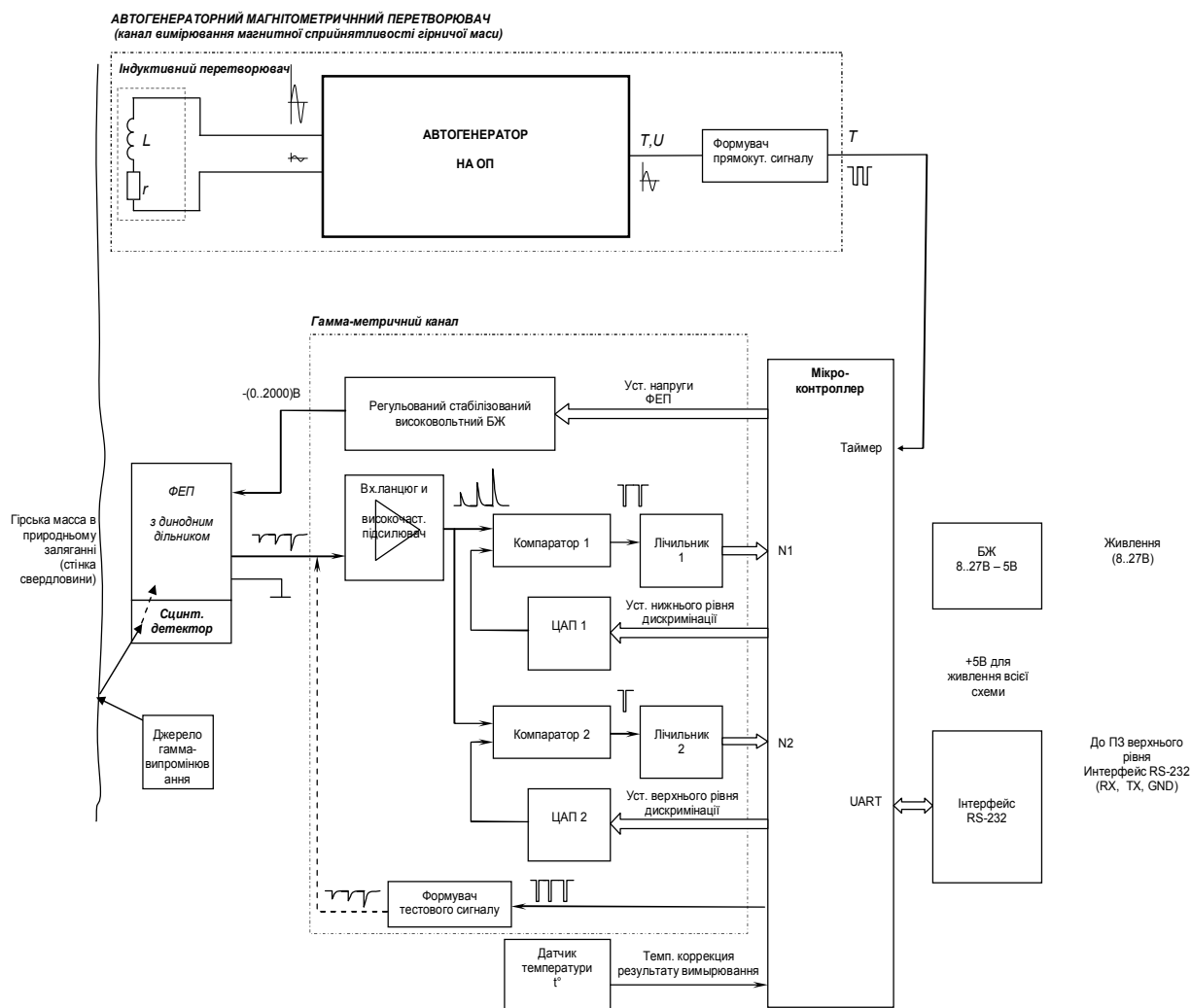


Рис. 5.6 Функціональна схема комбінованого свердловинного пристрою

Датчик функціонує наступним чином. В якості первинного вимірювального перетворювача гамма-гамма каналу використовується сцинтиляційний детектор гамма-випромінювання (кристал NaJ(Tl)), що перетворює потрапляючі на нього гамма-кванти в фотони (кванти світла), і фотоелектронний помножувач (ФЕП), що перетворює фотони в імпульси електричного струму. Сигнал з виходу ФЕП представляє собою короткі імпульси струму різної амплітуди. Полярність імпульсів - негативна.

імпульси надходять на вхідний високочастотний підсилювач, що перетворює їх в імпульси напруги, які потім подаються на два ідентичні канали порівняння і рахунку, що складаються з компаратора, цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) і лічильника. У цих каналах проводиться порівняння амплітуди імпульсів з деяким рівнем, заданим програмно за допомогою ЦАП. Якщо амплітуда вхідного імпульсу перевищує заданий рівень - на виході компаратора формується прямокутний імпульс негативної полярності, який збільшує значення лічильника на одиницю.

У каналі 1 підраховується загальна кількість імпульсів (N_1) з амплітудою вище нижнього рівня дискримінації, що зазвичай становить одиниці-десятки мілівольт. Таким чином відсікаються низько-енергетичні теплові шуми ФЕП і власні шуми вхідного підсилювача.

У каналі 2 підраховується число імпульсів (N_2) з амплітудою вище верхнього рівня дискримінації, зазвичай становить 1.5-2В, які викликані реєстрацією високоенергетичних гамма-квантів, що представляють собою природний радіаційний фон.

Далі мікроконтролер віднімає із значення N_1 значення N_2 , і, таким чином, виходить число імпульсів з амплітудою вище нижнього, але нижче верхнього рівня дискримінації, тобто знаходяться у вікні дискримінації.

Нижній і верхній рівні дискримінації встановлюються програмно. Таке технічне рішення дозволяє точно виділити інформативну область спектра реєстрованого гамма-випромінювання, за рахунок чого підвищується точність вимірювання вмісту заліза.

Перевагою програмного регулювання рівнів дискримінації є також можливість отримати амплітудний спектр (розподіл імпульсів за амплітудою) потоку імпульсів, що надходять і, відповідно, спектр реєстрованого гамма-випромінювання. Для цього слід встановити вузьке дискримінаційне вікно (10-20 мВ) і, варіюючи його положення (від 0 до 2.5В) вимірювати інтенсивність. Очевидно, що наявність спектра реєстрованого гамма-

випромінювання надзвичайно важливо при установці робочого вікна дискримінації.

Особливістю схеми датчика є також програмна установка і стабілізація вихідної напруги високовольтного блоку живлення, що подає високу напругу негативної полярності на фотокатод ФЕП. Стабілізація напруги запобігає зміні коефіцієнта перетворення ППП (ФЕП), що підвищує температурну та часову стабільність роботи датчика. Програмне регулювання дозволяє додатково стабілізувати роботу датчика за рахунок правильного вибору напруги живлення ФЕП. Для цього слід, варіюючи напругу, виявити горизонтальну ділянку залежності вимірюваної інтенсивності від напруги - т. зв. «Плато», тобто межа зміни напруги, при якому вимірюване значення інтенсивності змінюється в найменшій мірі.

Управління роботою датчика (установка параметрів, перезапуск рахунку, читання поточних значень N1, N2, часу вимірювання, результуючої інтенсивності і магнітної сприйнятливості) - проводиться через цифровий інтерфейс RS-232.

Живлення схеми датчика може проводитися від джерела нестабілізованої напруги завдяки вбудованому стабілізованому перетворювачу напруги (БЖ), перетворюючого напругу в діапазоні 8-27В в 5В.

Принципова схема розділена на дві частини, які розміщені на двох окремих платах: безпосередньо датчик і високовольтний блок живлення. Принципові схеми і друковані плати розроблені в програмному комплексі PCAD-2004.

Принципова схема датчика представлена на рис. 5.7. Вхідний ланцюг U1 призначений для захисту входу підсилювача при пробією ФЕП. Резистором R6 і конденсатором C6 встановлюється коефіцієнт посилення підсилювача U4: А.

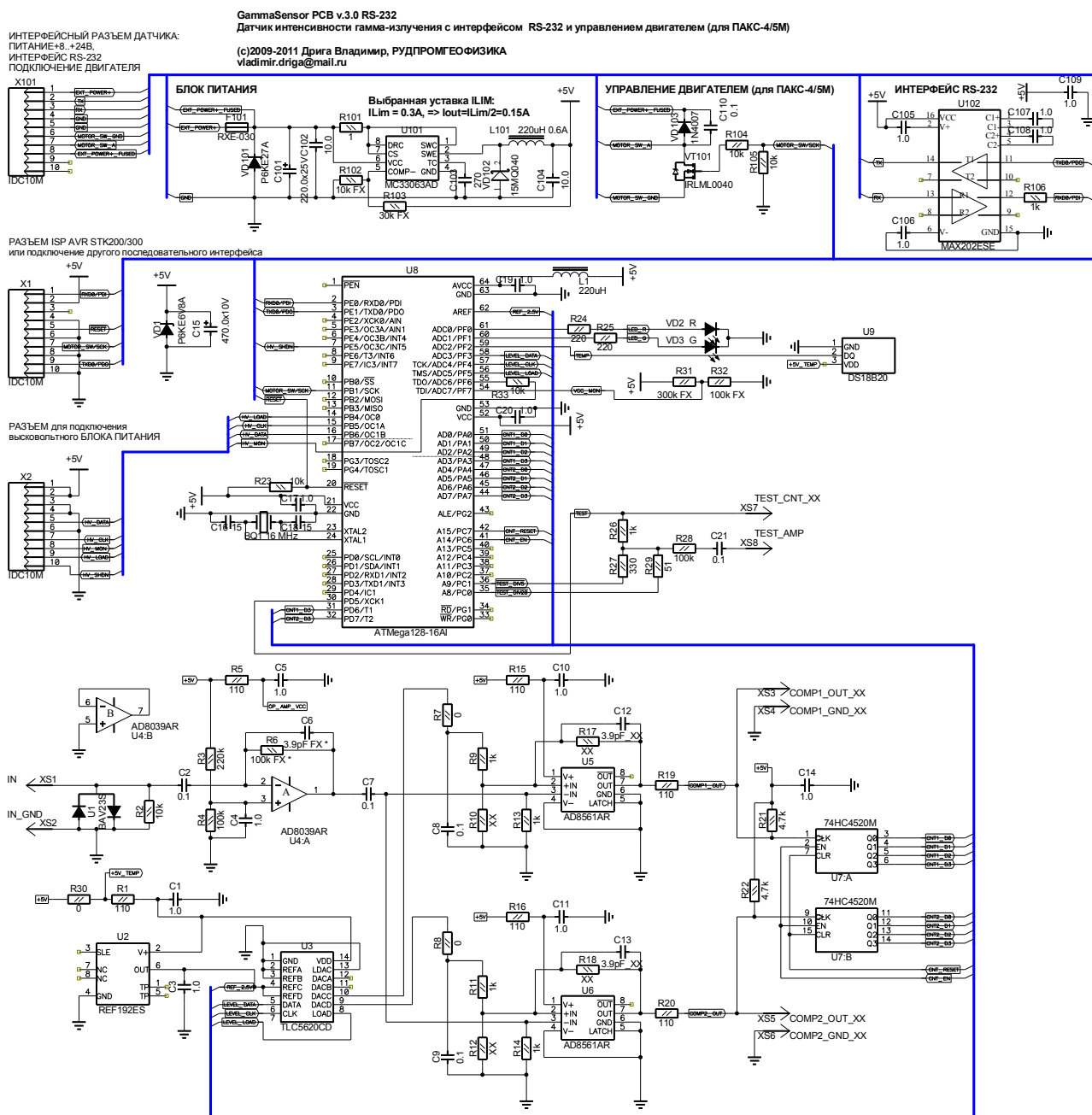


Рис. 5.7 Принципова електрична схема комбінованого свердловинного пристрою.

Опорна напруга для зведеного ЦАП U3 формується за допомогою джерела опорної напруги (ДОН) U2. Елементи U5, U6 - швидкодіючі компаратори, U7 - зведений 4-розрядний бінарний лічильник, призначений для попереднього ділення частоти зареєстрованих імпульсів на 16. Це необхідно для того, щоб мікроконтролер встигав підрахувати кілька (до 16) імпульсів, що слідує один за одним з малим інтервалом часу. Таким чином, при підрахунку числа імпульсів використані як зовнішні лічильники

(U7: A, U7: B), так і вбудовані в мікроконтролер таймери-лічильники (T1, T2).

Основу схеми складає мікроконтролер ATMEGA128 фірми Atmel, який тактується від кварцового резонатора, що необхідно для точного підрахунку часу вимірювання.

Функціональна схема високовольтного блоку живлення (БЖ) ФЕП приведена на рис. 5.8. Схема заснована на принципі підвищуючого (STEP-UP) імпульсного (ключового) перетворення напруги в схемі з індуктивністю. Підвищення напруги відбувається частково за рахунок явища самоіндукції в автотрансформаторі (в даній схемі - більш, ніж в 10 разів), частково - за рахунок коефіцієнта трансформації (1: 3), і далі - за рахунок додавання напруги при його випрямленні в помножувачі напруги (в 10 раз). Разом, при живленні від 5В схема може забезпечити регулювання вихідної напруги в межах від -100 до -2000В.

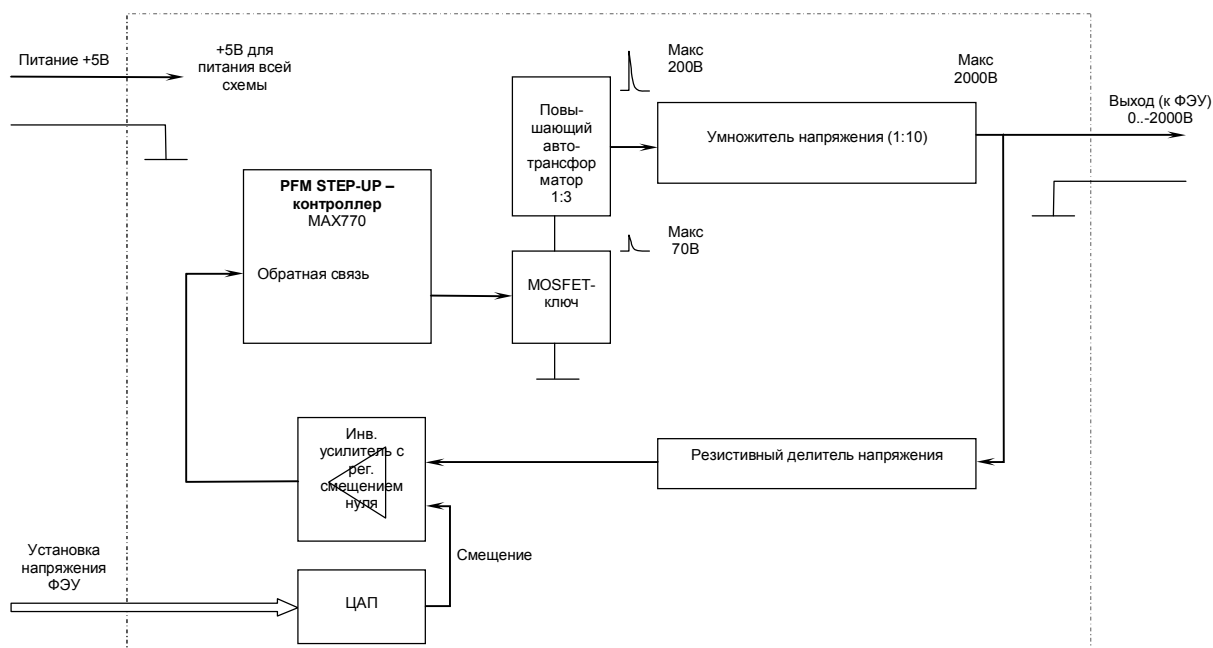


Рис. 5.8 Функціональна схема регулюючого стабілізуючого високовольтного блоку живлення.

Для регулювання і стабілізації вихідної напруги призначений негативний ЗЗ, що складається з високовольтного високоомного дільника, інвертуючого підсилювача і ЦАП, що задає зміщення для підсилювача.

Таким чином, установка вихідної напруги БЖ проводиться програмно мікроконтролером.

Принципова схема високовольтного БЖ наведена на рис. 5.9. Основа схеми - підвищуючий контролер U2 MAX770 (MAX770,771,772), включений за типовою схемою включення. Особливістю схеми є те, що дана мікросхема призначена для отримання позитивної вихідної напруги, а для живлення фотокатода ФЕП потрібно негативна відносно загального дроту («землі») напруга. Тому схема зворотного зв'язку містить операційний підсилювач (ОУ) U3: А, включений по інвертуючій схемі. Резистори R5, R7-R16 і R1 визначають коефіцієнт передачі даної схеми, і, відповідно вихідну напругу БЖ.

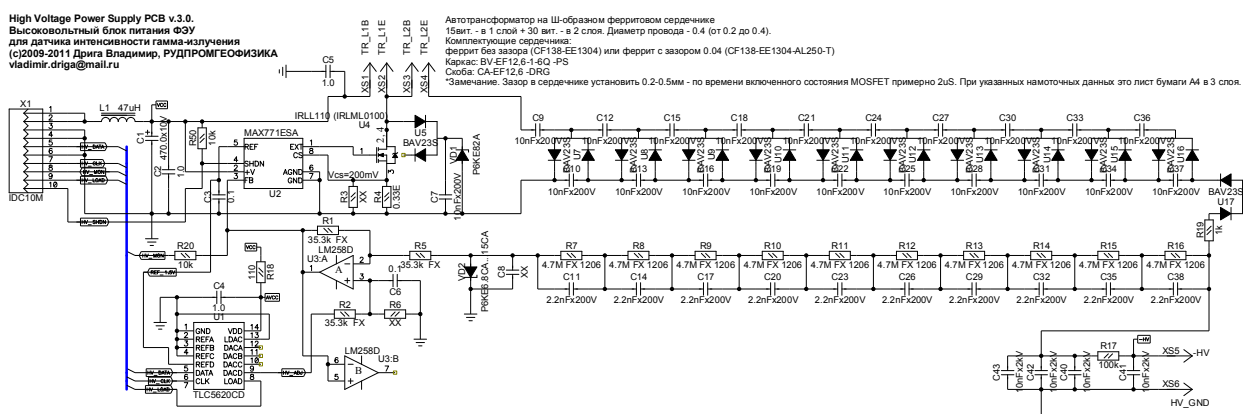


Рис. 5.9 Принципова схема регулюючого стабілізуючого високовольтного блоку живлення.

Захисний стабілітрон VD2 призначений для захисту входу ОП від перенапруги в разі пробоя дільника.

ЦАП U1 призначений для програмної установки рівня вихідної напруги БЖ. ЦАП використовує опорну напругу (REF), що формується контролером U2, яка становить 1.5В. Вихідна напруга БЖ залежить від значення, завантаженого в регістр ЦАП, а також від параметрів дільника R5, R7-R16 і R1 за такою формулою:

$$\left(1 - \frac{\text{ЦАП}}{256}\right) \text{REF} \frac{R5 + (R7 + R8 + \dots + R16)}{R1}, \text{ В.}$$

Таким чином, при значенні регістра ЦАП, що дорівнює 0 - вихідна напруга максимальна, і становить приблизно 2000 В (точне значення - 1998.7 В). при максимальному значенні регістра ЦАП, що дорівнює 255 - 7.8 В. Однак реально використовувані напруги, що застосовуються для живлення ФЕП - значно вищі, починаючи з 600 В.

ЦАП управляється мікроконтролером по послідовному інтерфейсу.

Резистор R4 0.33 Ом - встановлює максимальний струм для ключа U4. При напрузі V_{cs} даного контролера, що становить 200 мВ - це близько 0.6 А. Сердечник накопичувального дроселя (автотрансформатора) TR не повинен при цьому входити в насичення, тому в нього введений повітряний зазор до 0.5 мм. Величина даного зазору підбирається виходячи з необхідної індуктивності, щоб наростання струму через дросель від 0 до 0.6 А відбувалося за час близько 2 мс (оптимально для даного контролера).

Ланцюг U5, C7, VD1 призначений для захисту ключа від перенапруги, що виникає короткочасно за рахунок самоіндукції розсіювання автотрансформатора, яка завжди присутня через те, що коефіцієнт зв'язку первинної і вторинної обмоток менше 1.

Помножувач напруги C9-C37, U7-U6 зібраний на SMD-елементах. Максимально допустима зворотна напруга використовуваних діодів і максимально допустима робоча напруга конденсаторів становить 250В. Реально максимальна напруга становить не більше 200В на одну ступінь.

Ланцюг U7, R19, C40-C43 призначений для фільтрації пульсацій вихідної напруги БЖ.

Підключення ФЕП. Катод ФЕП і діодний дільник підключається двома проводами до виходу високовольтного БЖ (роз'єми XS5 (-HV) і XS6 (HV_GND)), як показано на рис. 5.10. Анод ФЕП підключається до входу підсилювача датчика (роз'єми XS1 (IN), XS2 (IN_GND)) екранованим дротом, екран якого заземлюється тільки з боку підсилювача.

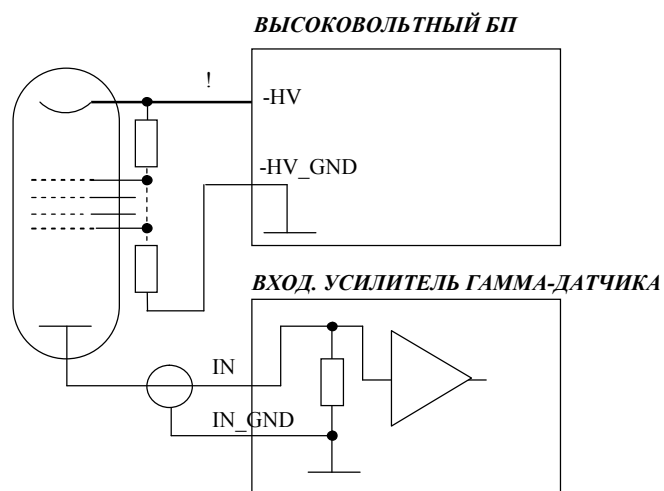


Рис. 5.10 Схема підключення ФЕП до високовольтного БЖ і вхідного підсилювача.

Загальний вигляд діодного дільника комбінованого свердловинного пристрою приведено на рис. 5.11. Встановлення сцинтиляційного лічильника приведено на рис. 5.12.



Рис. 5.11 Зовнішній вигляд діодного дільника ФЕП свердловинного пристрою.

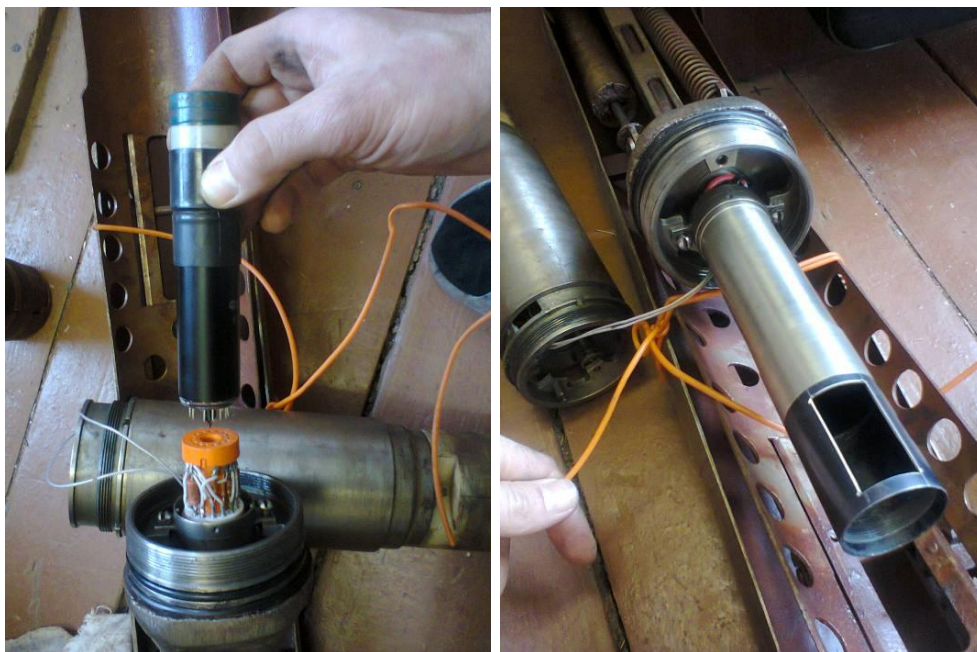


Рис. 5.12 Встановлення сцинтиляційного лічильника.

Магнітометричний канал. Для вимірювання магнітної сприйнятливості гірської породи схема містить автогенераторний магнітометричний перетворювач (МП, «магнітний» датчик), докладний опис функціональної і принципової схеми та принципу роботи якого наведено в розділі 2. Частотний сигнал з виходу МП реєструється окремим лічильником мікроконтролера U8 плати датчика (рис. 5.7).

Зовнішній вигляд плат з електронними компонентами комбінованого свердловинного пристрою наведено на рис. 5.13 та рис. 5.14



Рис. 5.13 Плати з електронними компонентами в зібраному стані, для встановлення в відсік свердловинного пристрою.

1 - плата магнітометричного каналу; 2 – плата високовольтного БЖ; 3 – плата датчика.

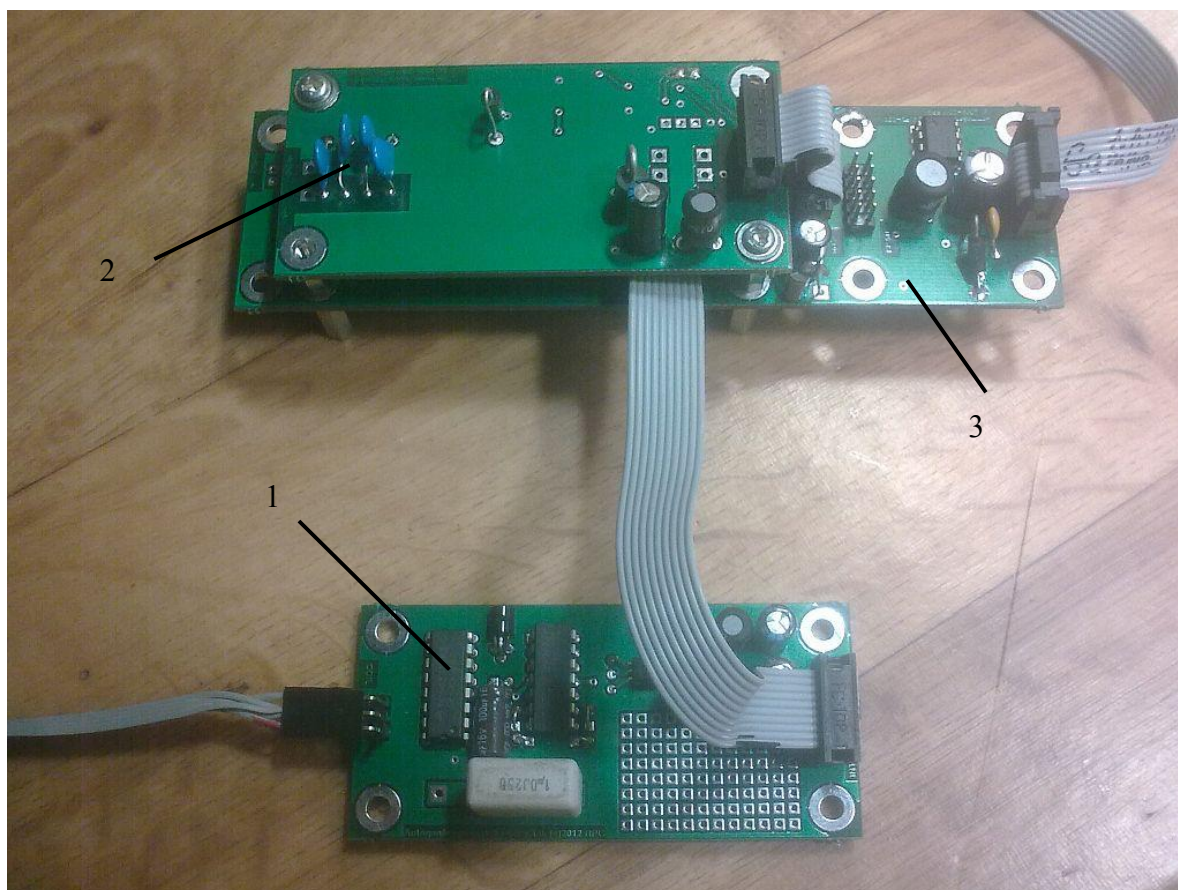


Рис. 5.14 Загальний вигляд електронних плат свердловинного пристрою
1 - плата магнітометричного каналу; 2 – плата високовольтного БЖ; 3 –
плата датчика.

До інтерфейсного роз'єму X101 (рис. 5.7) під'єднується шлейф, через який датчик підключається до джерела живлення, а також через який проходить лінія зв'язку інтерфейсу RS-232.

Зовнішній вигляд комбінованого свердловинного пристрою наведено на рис. 5.15.

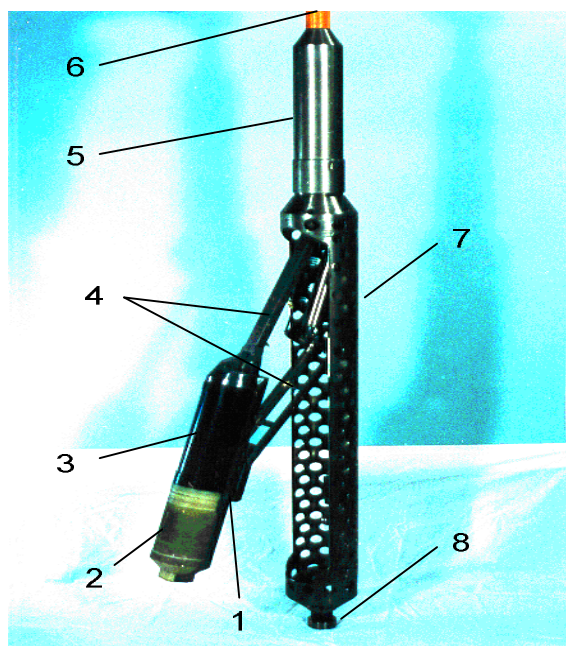


Рис. 5.15 Загальний вигляд комбінованого свердловинного пристрою
 1 – виносний блок; 2 - датчик магнітометричного каналу; 3 - датчик гамма-гамма каналу; 4 - механізм притискання виносного блоку; 5 - відсік електроніки; 6 - хвостовик; 7 - корпус свердловинного пристрою; 8 - механізм розкриття.

5.7 Програмне забезпечення

Програмне забезпечення комбінованого свердловинного пристрою складається з програми нижнього рівня (управляюча програма мікроконтролера плати датчика), програми верхнього рівня (додаток для налагодження параметрів пристрою).

Нижній рівень. Програмне забезпечення (ПЗ) нижнього рівня (комбінованого свердловинного пристрою) розроблено в середовищі ImageCraft IDE for ICCAVR 6 для мікроконтролера ATMEGA128. Текст ПЗ наведено в Додатку В.

1) Обмін даними з датчиком проводиться через регістри. Регістри пристрою діляться на *установчі* та *робочі*. Повна карта регістрів наведена в Додатку Г

Установчі реєстри (SetupReg) містять налаштування пристрою (режим роботи і т.п.), які встановлюються перед початком експлуатації пристрою. При включенні пристрою вони ініціалізуються з енергонезалежної пам'яті (EEPROM). За командою зберігаються в EEPROM. Починаються з адреси 0100h.

Робочі реєстри (Reg) містять поточні дані пристрої (змінні, результати вимірювань, і т.п.). Починаються з адреси R = 0140h.

Верхній рівень. Сервісний додаток «GammaMagnZond Test and Setup Tool v.1.4» під керуванням ОС MS Windows - призначений для налаштування параметрів комбінованого свердловинного пристрою, та перевірки його роботи. Додаток розроблений в середовищі Delphi 7. Головне вікно інтерфейсу додатку наведено на рис. 5.16.

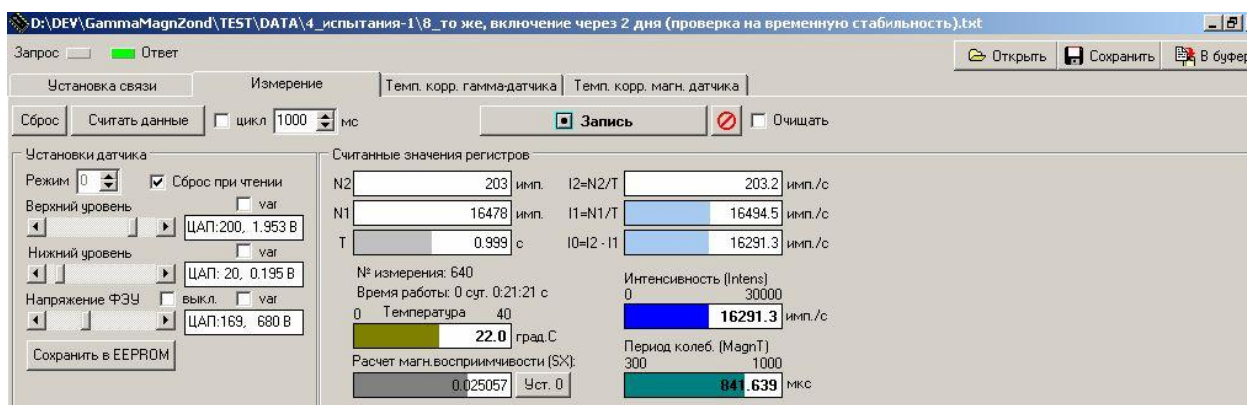


Рис. 5.16 Головне вікно сервісного додатку GammaMagnZond Test and Setup Tool v.1.4

Однією з основних функцій програмного забезпечення верхнього рівня є розрахунок магнітної сприйнятливості.

Методика розрахунку магнітної сприйнятливості.

Величина ефективної магнітної сприйнятливості обчислюється програмним забезпеченням верхнього рівня на основі двох значень періоду коливань автогенераторного МП, які воно отримує від програмного забезпечення нижнього рівня по протоколу RPG-ModBus.

Перше значення ($MagnT_0$) - вимірюється одноразово по команді «установка нуля магнітного датчика», яка подається оператором, коли

свердловинний пристрій знаходиться в розкритому стані та в магнітному полі вимірювальної котушки не знаходиться магнітний матеріал, це значення запам'ятовується в комірку оперативної пам'яті.

Друге значення ($MagnT$) - вимірюється в процесі вимірювання (по стінці свердловини або від еталонного зразка), тобто є поточне значення.

Значення ефективної **магнітної сприйнятливості** SX обчислюється за формулою:

$$SX = \frac{MagnT^2 - MagnT_0^2}{MagnT_0^2} = \left(\frac{MagnT}{MagnT_0} \right)^2 - 1$$

Очевидно, що відразу після «установки нуля» (присвоєння $MagnT_0 = MagnT$) значення SX дорівнюватиме 0.

5.8 Налаштування комбінованого свердловинного пристрою

Після зборки та перевірки функціонування всіх функціональних можливостей електронних схем, виконувалось налаштування гамма-метричного датчика з джерелом гамма-випромінювання і з зразком залізної руди з середнім вмістом заліза (або з зразком з ідентичними фізичними властивостями) (рис. 5.17).

Випробування включали наступне:

- Реєстрація спектра розсіяного гамма-випромінювання при різних високовольтній напрузі на ФЕП.
- Аналіз отриманих спектрів і вибір оптимальної напруги на ФЕП.
- Вибір робочого дискримінаційного вікна.
- Варіація напруги на ФЕУ і перевірка ширини «плато» [80].
- Визначення температурної залежності датчиків і їх компенсація.

Завершальний етап - випробування на стабільність показань інтенсивності і магнітної сприйнятливості в часі і при різних температурних режимах (прогрів/охолодження) [81].



Рис. 5.17 Налагодження свердловинного пристрою та перевірка стабільності роботи в лабораторних умовах.

- 1) реєстрація спектра розсіяного гамма-випромінювання при різних напругі на ФЕП (рис. 5.18-рис. 5.20)

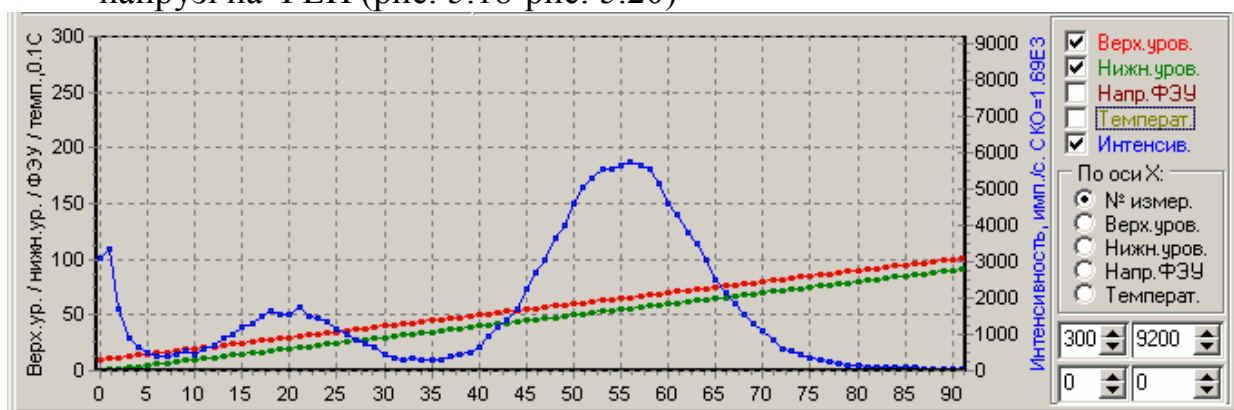


Рис. 5.18 Спектр при напругі на ФЕП 648 В.

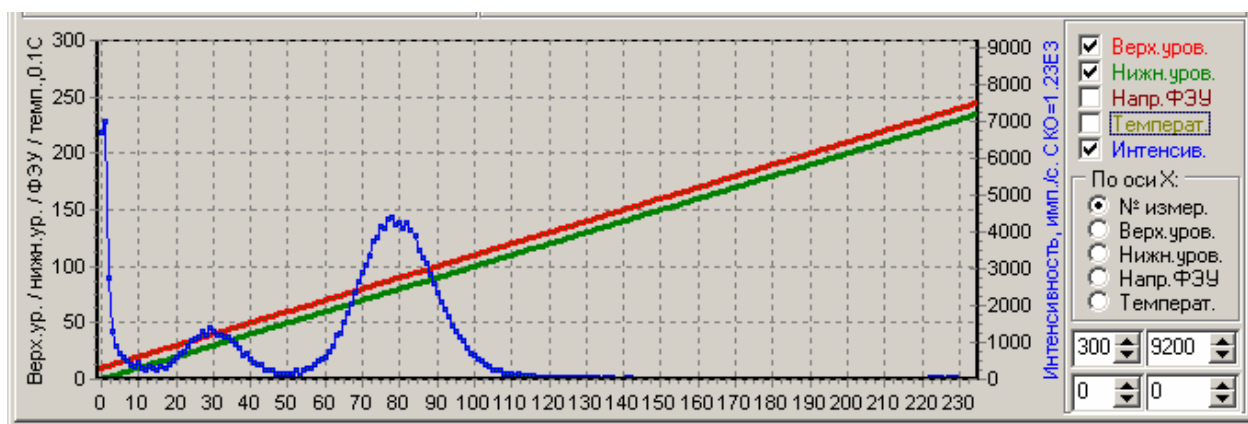


Рис. 5.19 Спектр при нагрузке на ФЕП 672 В.

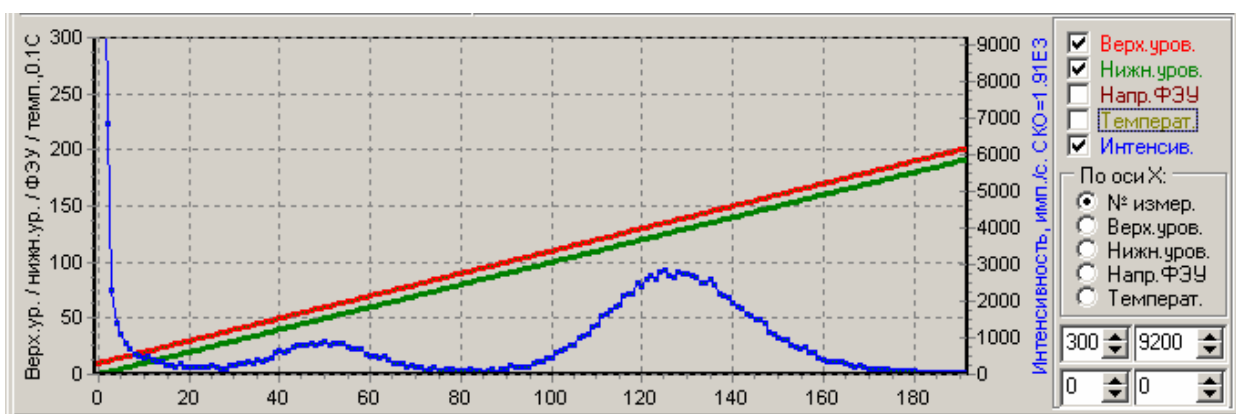


Рис. 5.20 Спектр при нагрузке на ФЕП 703 В.

- 2) Аналізуючи отримані спектри обираємо оптимальну напругу на ФЕП. (Спектр при напрузі 672 В. має найбільший діапазон розподілу імпульсів по амплітуді (напрузі), з чітким виділенням зони низько-енергетичних теплових «шумів») [82];
- 3) Вибір робочого дискримінаційного вікна. Обрано нижній рівень дискримінації, що становить 10 од. ЦАП, верхній - 180 од. ЦАП. (Діапазон, що відсікає низько-енергетичні теплові «шуми», та високо енергетичний радіаційний фон).
- 4) Варіація напруги на ФЕП і перевірка ширини «плато». На графіку рис. 5.20 можна виділити горизонтальну ділянку від 625 до 711 В, де інтенсивність залишається майже незмінною, незважаючи на значну зміну напруги на ФЕП. Центр даного плато припадає приблизно на 672 В

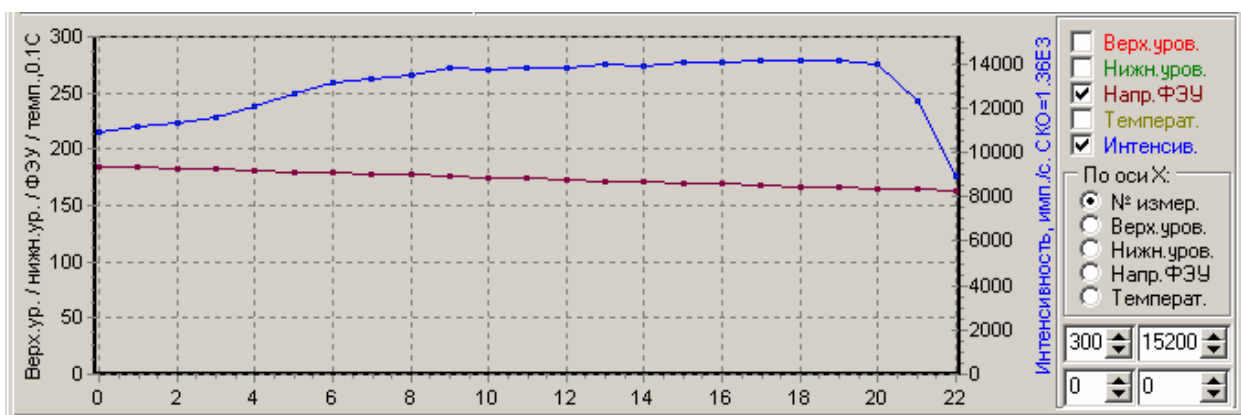


Рис. 5.21 Визначення «плато» ФЕП. Дискримінаційне вікно: 10-180 од.

5) Приклади часових діаграм, отриманих в результаті запису сигналів температури, сигналів гамма і магнітного датчиків, наведені на рис. 5.22-рис. 5.23.

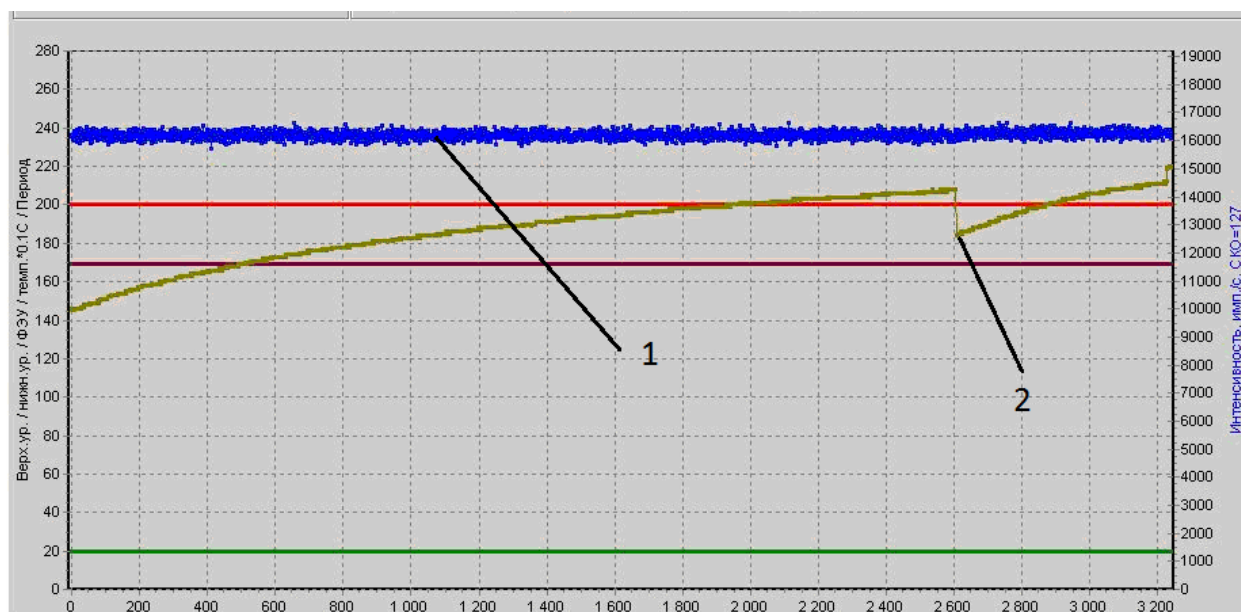


Рис. 5.22 Варіація температури всередині зондового пристрою (діапазон 14-22°C). 1 - сигнал гамма-датчика (інтенсивність); 2 - температура.

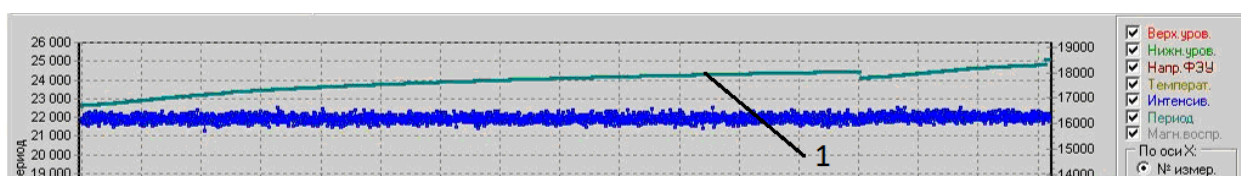


Рис. 5.23 Варіація температури всередині зондового пристрою (діапазон 14-22°C). 1 - сигнал магнітного датчика (магн. сприйнятливність)/

З наведених графіків рис. 5.22-рис. 5.23 видно, що зі збільшенням температури від 14 до 22°C інтенсивність (навіть при відсутності температурної корекції) досить слабо залежить від температури (визначається якістю сцинтилятора і ФЕП), а магнітна сприйнятливість змінюється приблизно від 0.023 до 0.025 відн. од.

5.9 Лабораторні випробовування свердловинного пристрою

Встановлено нижній рівень дискримінації - 20 од. АЦП, верхній - 180 од. Обрано напругу живлення ФЕП – 680 В.

Після калібрування температурної корекції проведені контрольні температурні випробування свердловинного пристрою, в діапазоні температур +5 - +25 °C . Результати наведено на рис. 5.24-рис. 5.25.

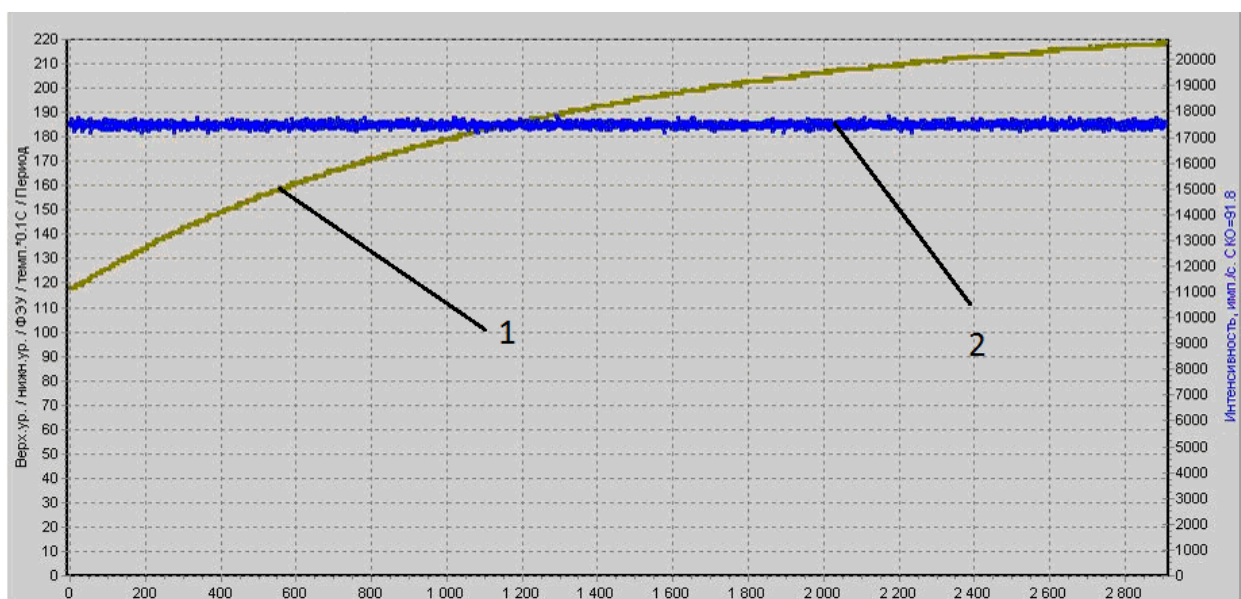


Рис. 5.24 Часова діаграма (темпер. корекції ввімкнена): 1 – температура всередині зонду; 2 – інтенсивність випромінювання.



Рис. 5.25 Часова діаграма при зміні температури всередині зонда. Сигнал магнітного датчика (магн. сприйнятливість). (темпер. корекції ввімкнена)

Висновки: З наведених вище результатів видно, що застосування температурної корекції сигналу автогенераторного магнітометричного перетворювача дозволяє на порядок зменшити температурну похибку показань заліза магнетитового, викликану нестабільністю параметрів вимірювальної котушки (ІІІ), і конденсатора контуру, використовуваних в перетворювачі.

Також було проведено контрольні температурні випробування свердловинного пристрою з програмним забезпеченням верхнього рівня мобільної станції «Кар'єр-Кривбас». Гамма-гамма і магнітний канали свердловинного пристрою були попередньо проградуєвані зразками з різним вмістом $Fe_{заг}$ (в діапазоні 18-56%) і $Fe_{магн}$ (в діапазоні 6-34 %). Потім пристрій був охолоджений на до $-5^{\circ}C$ на вулиці, занесений в приміщення, проведена установка нуля, встановлено два зразка руди із середнім вмістом $Fe_{заг}$ і $Fe_{магн}$, і розпочато запис вимірів пристрою до повного його прогріву, до кімнатної температури. ($+23^{\circ}C$). Період запису вимірювань становив 10 с. Результати наведені на рис. 5.26-рис. 5.28.

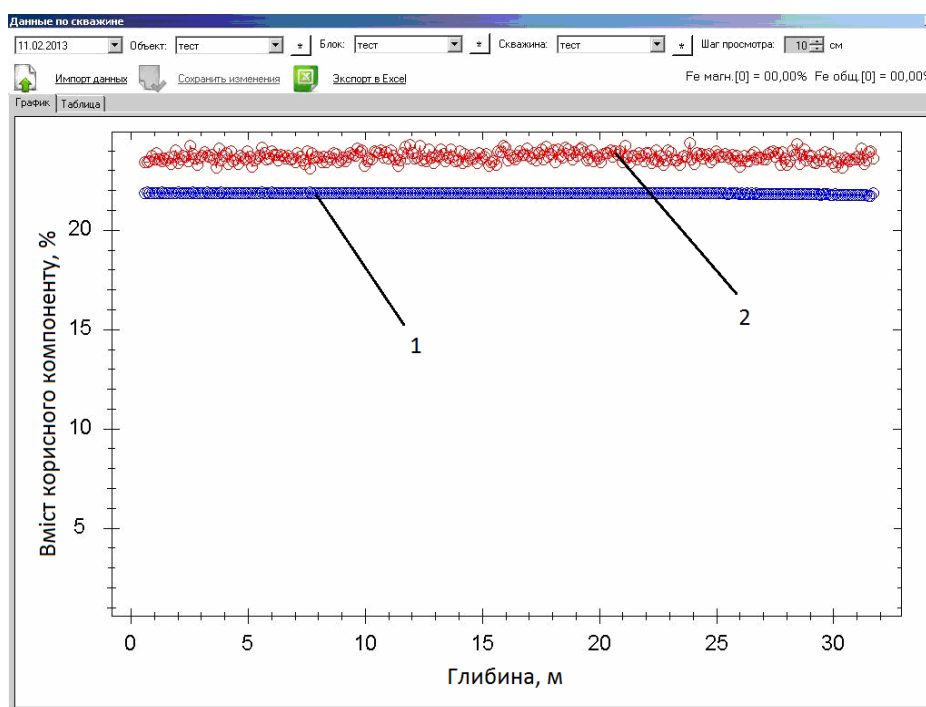
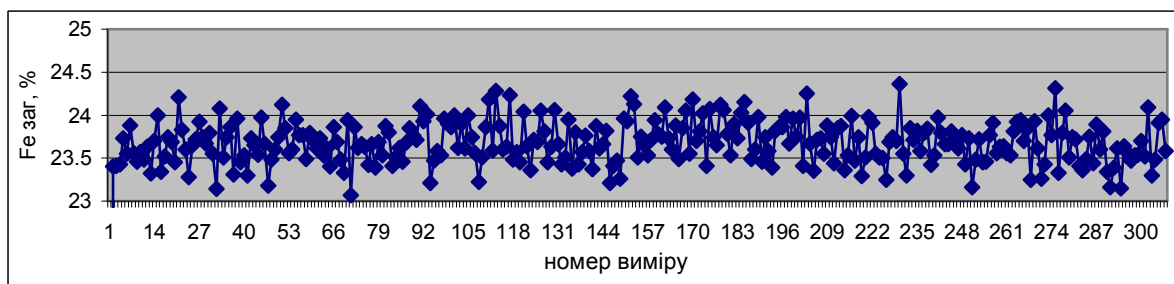
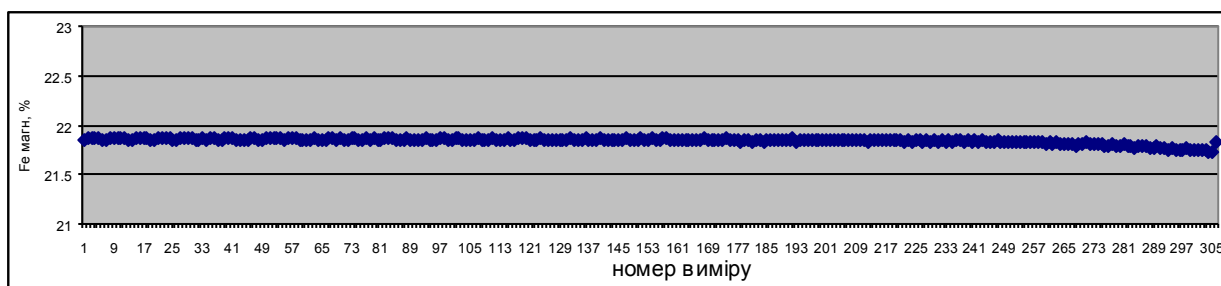


Рис. 5.26 Вікно програми «Кар'єр-Кривбас». Часова діаграма зміни показань вмісту при прогріванні свердловинного пристрою до кімнатної температури (приблизно на $30^{\circ}C$): 1 - $Fe_{магн}$ (синім); 2 - $Fe_{заг}$ (червоним).

Рис. 5.27 Часова діаграма зміни показань вмісту $Fe_{\text{заг}}$ Рис. 5.28 Часова діаграма зміни показань вмісту $Fe_{\text{магн}}$

Висновок: З наведених вище результатів очевидно, що температурна похибка показань вмісту як $Fe_{\text{заг}}$ так і $Fe_{\text{магн}}$ при зміні температури на 30°C не перевищує 0.5 % абс. одиниць вмісту, що задовольняє вимогам точності пристрою.

5.10 Інтеграція комбінованого свердловинного пристрою до складу мобільної каротажної станції

Для оцінки якості залізистих кварцитів по залізу загальному і пов'язаному з магнетитом у свердловинах, нині застосовуються мобільна каротажна станція «Кар'єр-1» та два різні типи апаратури з роздільною реєстрацією даних [69].

З метою підвищення точності і продуктивності визначення вмісту заліза по стінці вибухових свердловин, на базі автомобіля УАЗ- 452 була розроблена нова мобільна станція, за основу взята станція «Кар'єр-1», але внесено ряд істотних змін.

Встановлено двоканальний свердловинний пристрій, що забезпечує синхронну реєстрацію та передачу по цифровому інтерфейсу RS-232 до пам'яті персонального комп'ютера реального вмісту заліза загального і пов'язаного з магнетитом з подальшим відображенням на екрані бортового комп'ютера (ноутбука), як в графічному, так і в цифровому вигляді. Це досягається тим, що вимірювальний блок свердловинного пристрою містить дві поєднані вимірювальні системи - магнітний датчик і датчик селективного гамма-гамма методу. У окремому відсіку встановлено одно-барабанну лебідку з довжиною каротажного кабелю до 100 м, оснащена 4-х швидкісним редуктором, кабелеукладацьником, гальмом, виносною стрілою з блок-балансом (реєстратором пройденого шляху свердловинним пристроєм). Маса лебідки - 120 кг (В станції «Кар'єр-1» (УАЗ-452) встановлена двобарабанна лебідка з довжиною кабелю по 60 м, що обмежує можливості роботи двошвидкісного редуктора. Маса лебідки 400 кг)

Загальний вигляд мобільної станції «Кар'єр-Кривбас» наведено на рис. 5.29.



Рис. 5.29 Загальний вигляд станції «Кар'єр-Кривбас» з комбінованим свердловинним пристроєм.

Привід лебідки в станції здійснюється від двигуна постійного струму, що живиться від акумуляторів 6-ст- 190 А*год. напругою 24 В. Струм при навантаженні не перевищує 16 А. Акумулятори встановлені в спеціальному

відсіку, виготовленому з нержавіючої сталі і обладнаному природною і примусовою вентиляцією. Відсік вміщує 4 акумуляторних батареї, що забезпечує безперервну роботу станції впродовж 12 годин. Управління лебідкою здійснюється оператором з салону автомобіля за допомогою спеціальної панелі управління і органів управління лебідки.

Функціональна схема мобільної станції (рис. 5.30).

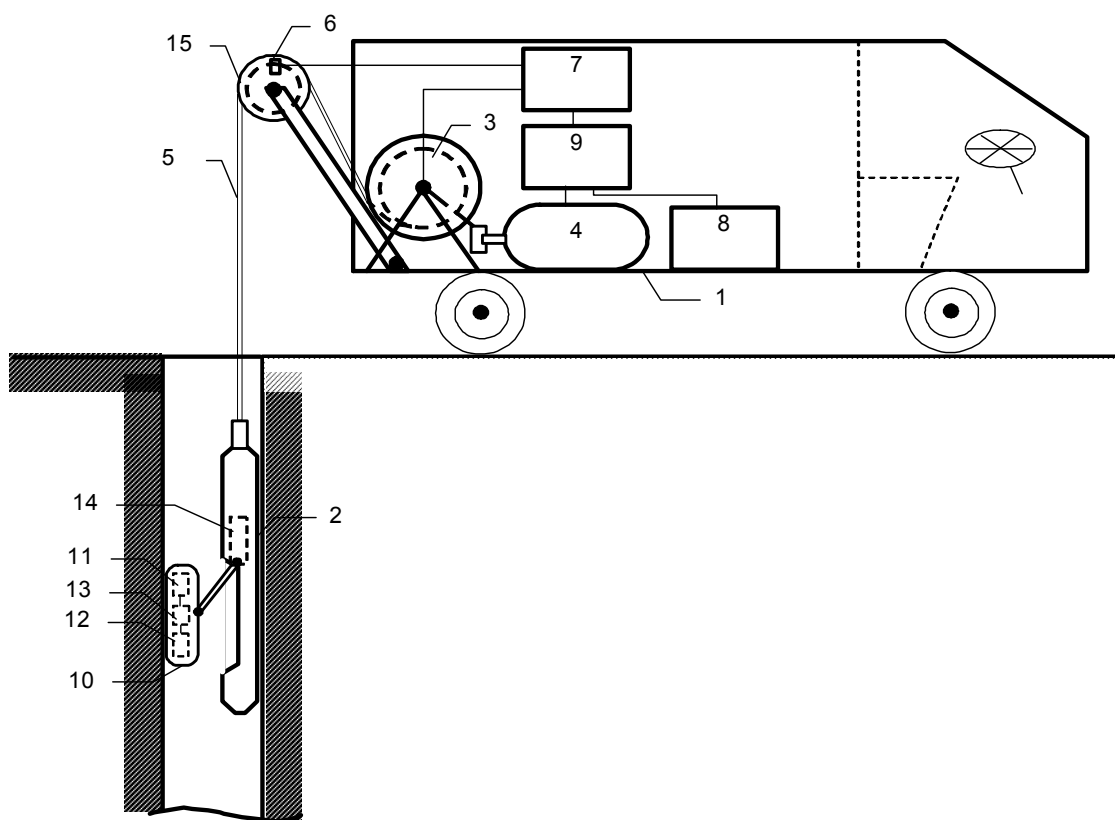


Рис. 5.30 Функціональна схема мобільної станції «Кар'єр-Кривбас»

Станція містить розміщені на автомобільному шасі 1 комбінований свердловинний пристрій 2, механізм переміщення свердловинного пристрою 2 по глибині свердловини, виконаний у вигляді лебідки 3, що приводиться в дію електродвигуном 4 і з'єднаний кабель-тросом 5 з свердловинним пристроєм 2, датчик 6 глибини занурення свердловинного пристрою 2, реєстратор 7 даних вимірювання, виконаний у вигляді переносної ЕОМ і з'єднаний входом з датчиком 6 глибини та кінцем кабель-тросу 5, блок живлення 8 (акумуляторні батареї) електродвигуна 4, свердловинного пристрою 2, реєстратора 7, блок 9 управління роботою станції. У

свердловину пристрої 2 розміщені виносний блок 10, що містить гамма-датчик 11 заліза загального та автогенераторний датчик 12 магнітної сприйнятливості (датчик вмісту заліза магнітного) і перетворювач 13 сигналів, виконаний на базі мікроконтролера і з'єднаний входами з виходами гамма-датчика 11 і автогенераторного датчика 12 магнітної сприйнятливості, механізм 14 притиснення зонда 10 до стінки свердловини. Кінець кабель-троса 5, що підіймає свердловинний пристрій 2 та з'єднаний з лебідкою 3 через блок баланс 15. Вихід перетворювача 13 електричними жилами кабель-троса 5 з'єднаний з іншим входом реєстратора 7 [83].

Станція працює наступним чином: комбінований свердловинний пристрій 2 за допомогою переміщення автомобіля виставляється над свердловиною. З блоку управління 9 подають команду на спуск свердловинного пристрою 2. За цією командою відпускається тормозний пристрій лебідки 3, під дією ваги свердловинного пристрою 2 кабель-трос 5 через блок-баланс 15 змотується з барабана лебідки 3 і комбінований пристрій 2 опускається в свердловину до упору в її забій. При упорі нижнього кінця свердловинного пристрою 2 в забій спрацьовує механізм 14 притиснення, який притискає виносний блок 10 до стінки свердловини. Після цього з блоку управління 9 одночасно подають команду на запису даних реєстратором 7 і подачу живлення з акумуляторної батареї 8 на електродвигун 4. Електродвигун 4 приводить в обертання барабан лебідки 3 на який починає намотуватися кабель-трос 5, піднімаючи тим самим свердловинний снаряд 2, з постійною швидкістю. По мірі підняття свердловинного пристрою, при проходженні ним заданого інтервалу глибини, датчик 6 глибини занурення, відправляє до реєстратора 7 команду, при отриманні якої реєстратор 7 відправляє запит даних до комбінованого свердловинного пристрою.

При отриманні по цифровому інтерфейсу RS-232 запиту даних вимірювання, програмне забезпечення нижнього рівня (мікроконтролера) формує пакет даних для відправлення, для чого зчитує відповідні значення

лічильників. Сформовує пакет даних і відправляє їх по кабель-тросі на реєстратор.

Після отримання пакету даних вимірювання, програмне забезпечення верхнього рівня, зчитує значення інтенсивності інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання (N) та магнітної сприйнятливості (Sx), в відповідних регістрах пакету, та за допомогою коефіцієнтів калібрувальних залежностей розраховує значення заліза загального, та заліза магнетитового. Розраховані значення відображаються на моніторі комп'ютера (рис. 5.31).

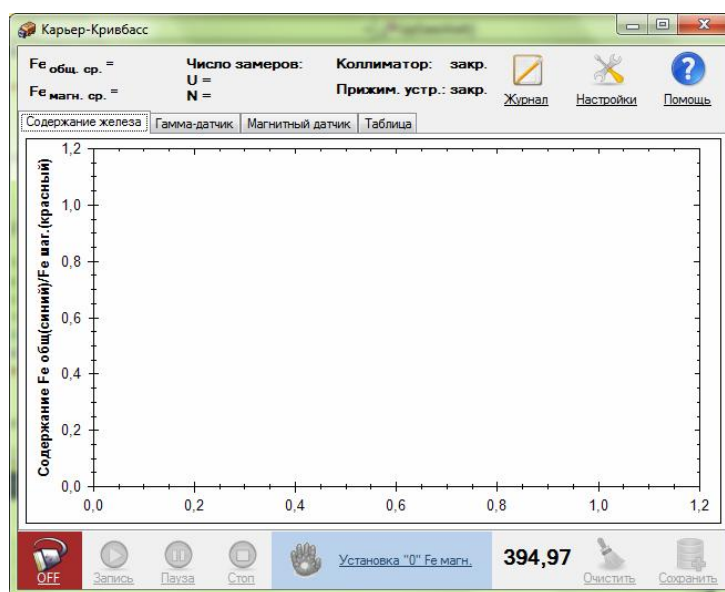


Рис. 5.31 Головне вікно програмного забезпечення мобільної станції «Кар'єр-Кривбас»

По завершенню вимірювань по свердловині командою оператора результати зберігаються в базі даних.

В якості реєстратора даних вимірювань використовується портативна ПЕОМ типу Notebook, яка живиться від бортових акумуляторів напругою 12 В через перетворювач напруги 12/220 В. Дані на порт ПЕОМ від свердловинного пристрою та датчика пройденого шляху зондовим пристроєм надходять через блок-погодження.

Результати вимірювань вмісту заліза загального та заліза пов'язаного з магнетитом відображаються (у відсотках) на екрані комп'ютера з прив'язкою їх до глибини контрольованої ділянки свердловини. Програма ПЕОМ

відображає інформацію на екрані у вигляді таблиць або графіків зміни відсоткового складу корисного компонента по глибині свердловини (рис. 5.31) або в вигляді зміни умовних одиниць (інтенсивності гамма-випромінювання N імп/с, величини магнітної сприйнятливості Sx м.о.) [83].

5.11 Промислові випробовування мобільної станції

Випробовування мобільної станції «Кар'єр-Кривбас» з комбінованим свердловинним пристроєм проводилися з метою перевірки її придатності при вирішенні задачі, що передбачає кількісну оцінку вмісту заліза загального і заліза магнетитового в залізистих кварцитах в їх природному заляганні по стінці вибухової свердловини шарошкового буріння великого діаметру (250 мм).

Промислові випробовування виконувались на кар'єрі №2 ПАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат». На блоці № 8, гор. - 65 м, де було проведено вимірювання в двох свердловинах № 3а та 5, глибиною 16 і 26 м, відповідно. Даний блок представлений неокисленими залізо-слюдко-магнетитовими і напівокисленими залізо-слюдко-магнетитовими кварцитами.

На другому блоці (№ 6, гор. -170 м) проведено вимірювання 7-ми свердловин загальною глибиною 224 м. Ці свердловини пересікають малорудні магнетито-хлоритові кварцити (5 свердловин) і сланці (2 свердловини).

Для даного етапу випробувань комбінованого свердловинного пристрою станції «Кар'єр-Кривбас» були обрані, в основному, сухі свердловини, по яким попередньо проведено вимірювання станцією «Кар'єр-1», з свердловинними пристроями, де реалізується метод гамма-гамма для $Fe_{\text{заг}}$ і апаратурою РВМС-1, яка використовує дві котушки для реєстрації магнітної сприйнятливості для визначення вмісту заліза пов'язаного з магнетитом ($Fe_{\text{магн}}$).

У зв'язку з цим промислові випробовування переслідували мету - підтвердження правомірності і доцільності використання нового комбінованого свердловинного пристрою на основі результатів порівняльних

випробувань паралельно з зондовими пристроями, які позитивно себе зарекомендували та з успіхом застосовуються останні декілька десятків років.

Результати досліджень наведені у Додатку Д.

При аналізі найбільш характерних діаграм гамма-гамма-каналу отриманих в результаті вимірювань, встановлено:

- характер діаграм практично співпадають по усій глибині свердловин;
- відмінність діаграм в окремих інтервалах можна пояснити тим, що в вимірювальну зону датчиків потрапляли різні сектори стінки свердловини (відсутність азимутальної прив'язки зондових пристроїв);
- відхилення в кількісних визначеннях вмісту $Fe_{заг}$ пов'язане з різними умовами градуювання пристроїв. Комбінований зондовий пристрій градуювався за стандартними зразками в лабораторних умовах, а зондові пристрої «Кар'єр-1» - в спеціально підготовлених контрольно-градуювальних свердловинах (розподіл вмісту корисного компоненту в яких визначався хімічним аналізом зразків) [84, 85].

Для прикладу на рис. 5.32 наведено діаграми розподілу заліза загального у свердловині № 9.

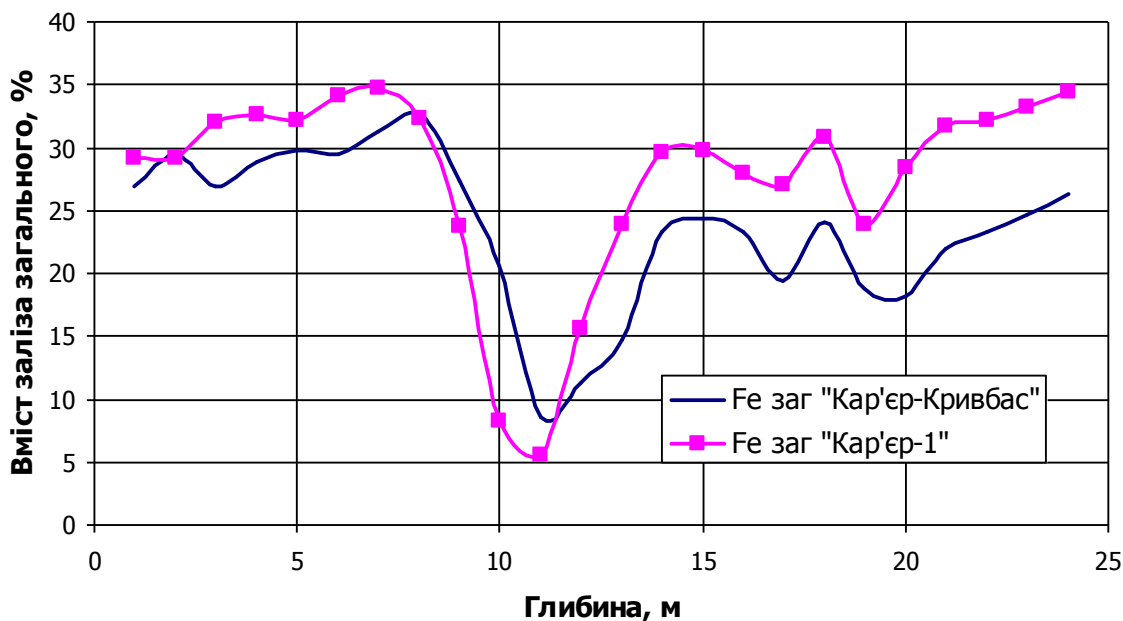


Рис. 5.32 Розподіл заліза загального у свердловині № 9.

Таким чином, результати цього етапу промислових випробувань підтвердили правомірність використання каналу, що реалізує селективний гамма-гамма метод комбінованого свердловинного пристрою з радіонуклідом Am-241, для визначення вмісту заліза загального в вибухових свердловинах [86].

Наступний етап - випробовування магнітометричний канал комбінованого свердловинного пристрою, який істотно відрізняється конструктивними і вимірювальними характеристиками від двокотушкового зонду РВМС-1 станції «Кар'єр-1». Слід зазначити, що розмір магнітного датчику в комбінованому свердловинному пристрої складає по висоті 10 см, що забезпечує глибинність вимірів, приблизно, 50 мм. Відстань між приймальною і генераторною котушками зонду РВМС-1 складає 0.5 м, чим забезпечується глибинність досліджень 20...25 см і усувається, в певних межах, необхідність у використанні притискних пристроїв. З цього слідує, що зонд РВМС-1 має певну перевагу. Проте вона істотно втрачає свою значущість, якщо враховувати, що комбінований свердловинний пристрій працює в контактній геометрії і його глибинність цілком достатня, щоб достовірно визначити

вміст заліза магнітного в рудному пласті, що перетинається свердловиною. Крім того, він дозволяє з більшою детальністю локалізувати рудні і безрудні включення, контакти порід, а у поєднанні з даними селективного гамма-гамма каналу, успішно вирішується завдання літологічного розчленовування розрізу гірських порід по свердловині [87].

Для прикладу на рис. 5.33 наведено діаграми розподілу заліза магнетитового у свердловині № 9.

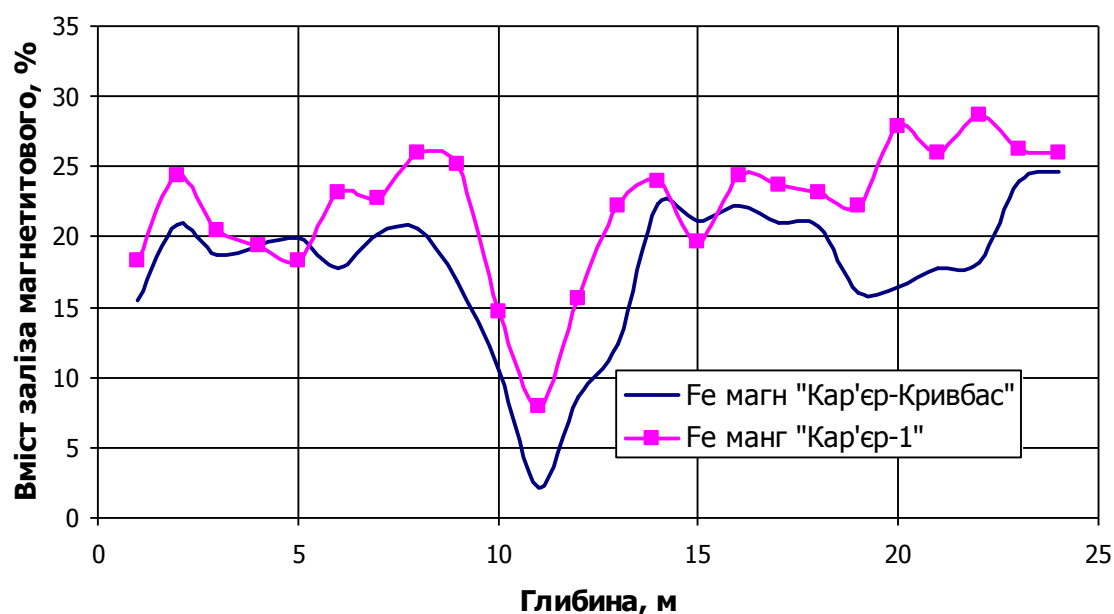


Рис. 5.33 Розподіл заліза магнетитового у свердловині № 9.

Результати досліджень (Додаток Д) свідчать, що характер та форми діаграм для порівнюваних систем магнітних пристроїв практично однакові. Деякі невідповідності в окремих точках можна пояснити осьовим переміщенням зондового пристрою та різним кроком вимірів. Від комбінованого зондового пристрою інформація поступає на комп'ютер через кожні 10 см (усереднене значення по інтервалу), тоді як виміри зондом РВМС-1 виконуються в дискретному режимі з кроком 25 см. Відмінність рівнів визначення вмісту $Fe_{\text{магн}}$ обумовлена, як і для гамма-гамма каналу, різними умовами градуювання, що легко може бути кореговане в подальшій роботі [88].

Особливий інтерес представляє спільний розгляд діаграм гамма-гамма та магнітометричного каналів, отриманих від комбінованого пристрою станції «Кар'єр-Кривбас», на прикладі рис. 5.34. Тут, зважаючи на співвідношення між вмістом заліза загального і заліза магнетитового, можна констатувати наступне:

- у інтервалі 0...9 м свердловина перетинає товщу напівокислених залізистих кварцитів, які, судячи з геологічної будови досліджуваного блоку, представлені залізо-слюдко-мартито-магнетитовими кварцитами;
- у інтервалі 10...13 м свердловина перетинає явно безрудне включення потужністю приблизно 3м;
- у інтервалі 13...24 м свердловина входить в зону неокислених залізистих кварцитів, представлених на цьому блоці залізо-слюдко-магнетитовими різновидами.

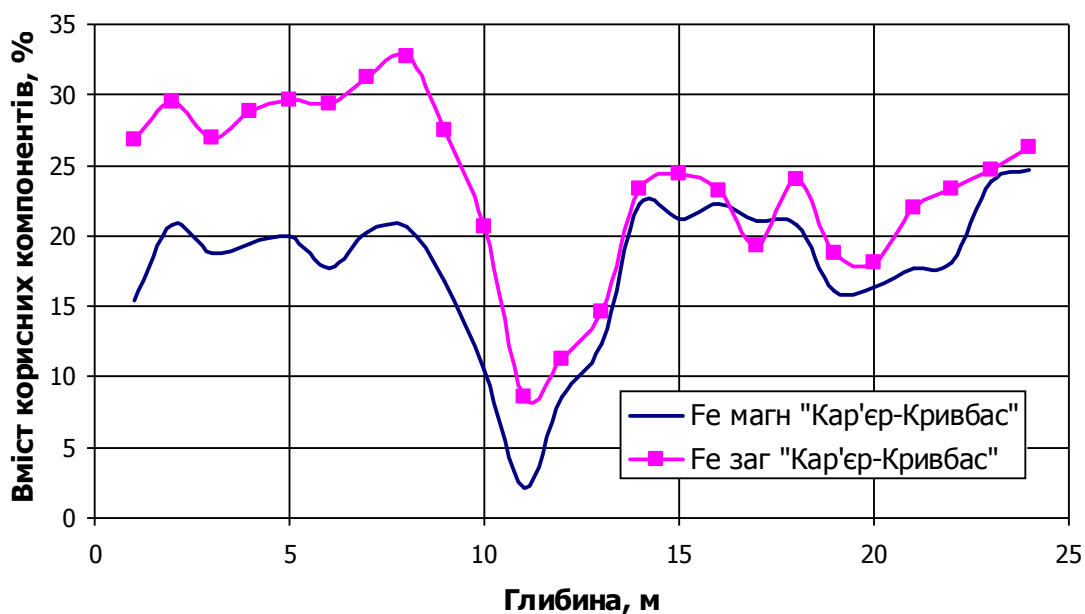


Рис. 5.34 Розподіл заліза загального та заліза магнетитового в свердловині № 9 по даним комбінованого свердловинного пристрою.

Точність збігу вимірювань двох станцій становить: $\pm 1,44$ % по залізу загальному, та $\pm 1,68$ % по залізу магнетитовому.

На рис. 5.35, рис. 5.36 приведений результат випробувань на предмет відтворюваності результатів визначення заліза загального і заліза пов'язаного з

магнетитом при різних швидкостях підйому комбінованого свердловинного пристрою. Відтворюваність результатів висока. Окремі невеликі різнознакові розбіжності пояснюються неможливістю виконати два різні виміри у одній і тій же точці свердловини. Відсутність же систематичних похибок вказує на можливість підвищення швидкості підйому свердловинного пристрою до 540 м/год.

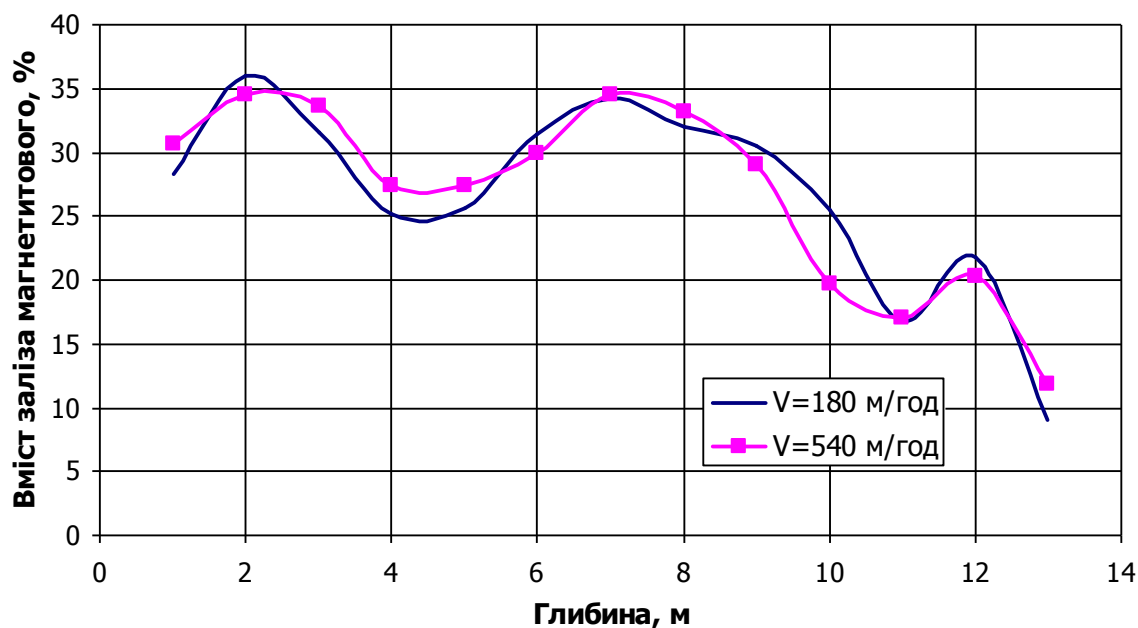


Рис. 5.35 Порівняння даних вимірювання заліза пов'язаного з магнетитом у свердловині № 3 на різних швидкостях підйому зондового пристрою.

Випробовування станції на обводнених свердловинах.

Випробовування станції проводилось в умовах кар'єру ПАТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» на горизонті -195 м. у блоці № 30. В ході випробувань проведено вимірювання 11 свердловин, у тому числі і на свердловинах (№ 6-11), які штучно заповнювалися мінералізованою водою цього кар'єру, з рівнем води до 6 м.

Для зіставлення даних виконувались вимірювання комбінованим свердловинним пристроєм станції «Кар'єр-Кривбас» з джерелом Am-241 на залізо загальне по сухій свердловині, яку потім частково заповнювали водою

і виконували повторне вимірювання. Порівняльні дані по свердловині № 6 представлені на рис. 5.37, а по свердловині № 8 на рис. 5.38.

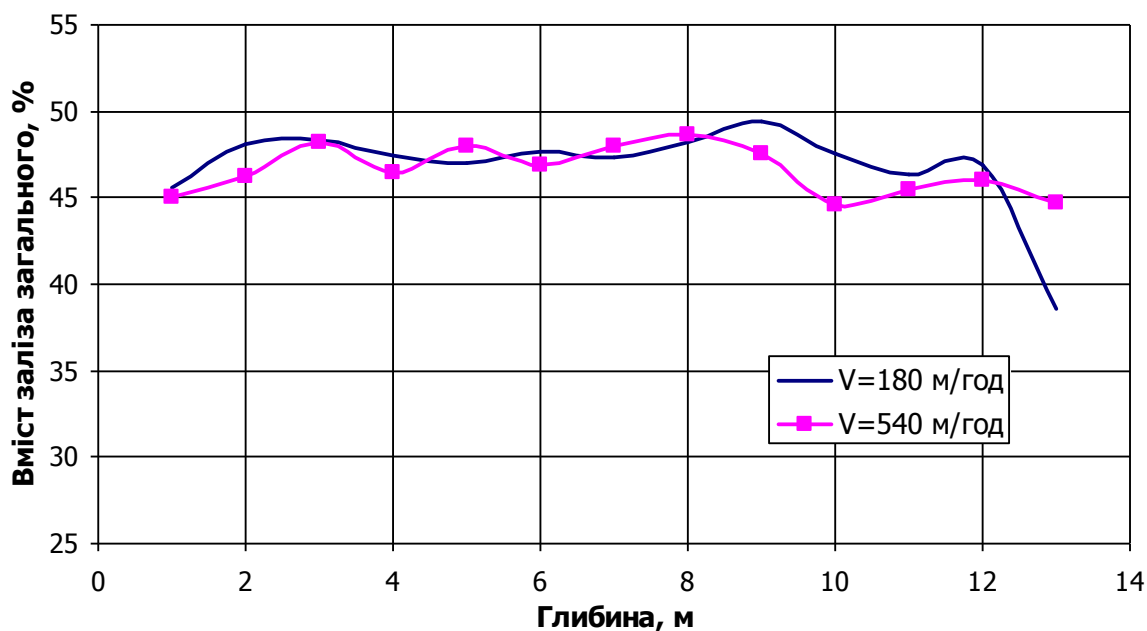


Рис. 5.36 Порівняння даних вимірювання заліза загального у свердловині № 3 на різних на швидкостях підйому зондового пристрою:

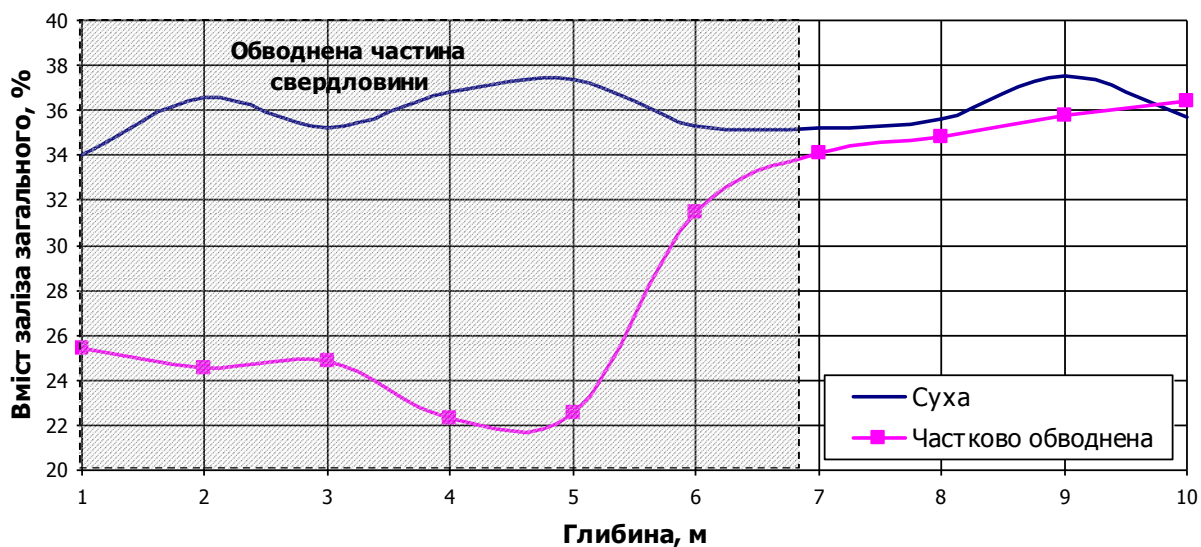


Рис. 5.37 Розподіл вмісту заліза загального у свердловині № 6 за даними станції «Кар'єр-Кривбас» (без урахування обводненості свердловини).

Результати порівняння отриманих даних по свердловинах №6 і №8 приведені в таблиці. 5.2.

Аналіз отриманих даних свідчить про значне збільшення похибки на обводнених інтервалах свердловин (до 8 % абс.), в порівнянні з сухими інтервалами (1,73 % абс.).

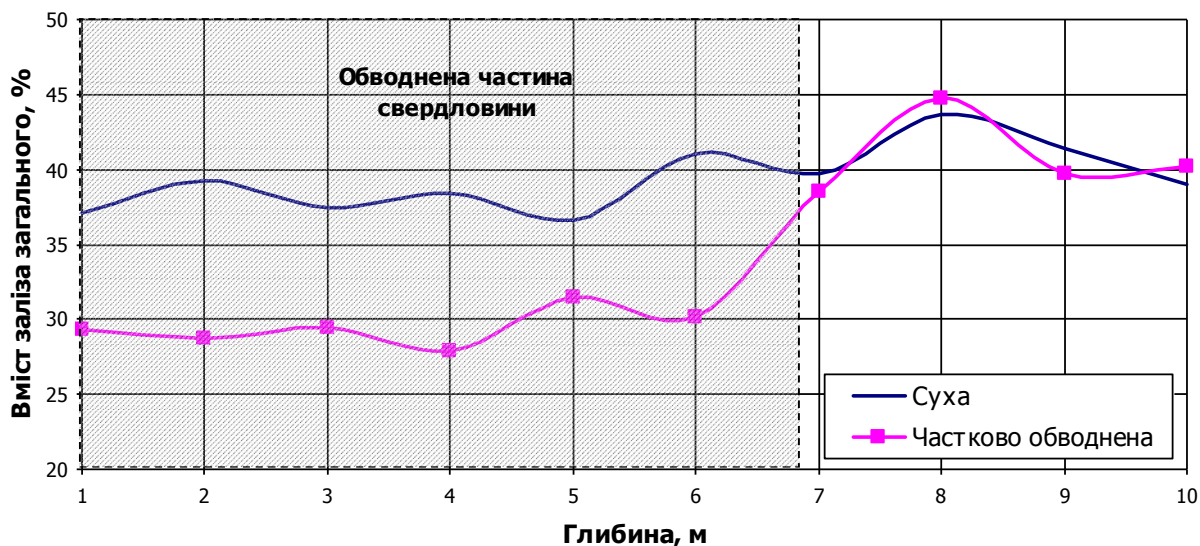


Рис. 5.38 Розподіл вмісту заліза загального у свердловині № 8 за даними станції «Кар'єр-Кривбас» (без урахування обводненості свердловини).

Таблиця 5.2

Результати досліджень комбінованого свердловинного пристрою
без врахування впливу обводненості

Параметри	Свердловина	
	№6	№8
Середнє по сухій свердловині	35,93	34,0
Похибка вимірювань на сухих інтервалах	1,37	0,90
Похибка вимірювань на обводнених інтервалах	8,07	6,78

Для визначення вмісту заліза загального в частині свердловини, яка обводнена, застосований математичний апарат, заснований на описаному в розділі 5.3 методі масштабних коефіцієнтів.

Розрахунок виконується після закінчення вимірювань по свердловині у декілька етапів.

На початку виконується аналіз даних та визначається висота стовпа води у свердловині.

Рівень води визначається автоматично, в процесі вимірювання за наступними ознаками. При виході зонду з води різко збільшується різниця між вмістом заліза загального і магнітного (різко зменшується інтенсивність гамма-гамма каналу) [89].

Після визначення висоти заповнення свердловини водою здійснюється наступний етап - визначення вмісту заліза загального в частині обводненої свердловини.

Розрахунок вмісту заліза загального $Fe_{заг.расч.}$ у частині, що обводнена, робиться за наступною формулою:

$$Fe_{заг.розн.} = \left(\frac{A}{Fe_{магн}} + B \right) \cdot \frac{Fe_{заг.ср.сух}}{Fe_{магн.ср.}}, \quad (5.1)$$

де A, B - коефіцієнти рівняння регресії;

$Fe_{магн}$ - поточний вміст заліза пов'язаного з магнетитом;

$Fe_{заг.ср.сух.}$ - середній вміст заліза загального в сухій частині свердловини;

$Fe_{магн.ср.}$ - середній вміст заліза пов'язаного з магнетитом по усій висоті свердловини.

В результаті розрахунків розподіл вмісту заліза загального по свердловині № 6 набуває вигляду, що наведений на рис. 5.39., а по свердловині № 8 на рис. 5.40.

Результати порівняння вимірів по сухим і обводненим свердловинам, з застосуванням методу масштабних коефіцієнтів наведено в таблиці 5.3.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що застосування методу масштабних коефіцієнтів на обводнених інтервалах свердловини зменшує похибку вимірювань в 3,5 рази.

Таблиця 5.3

Результати досліджень комбінованого свердловинного пристрою на обводнених свердловинах з застосуванням методу масштабних коефіцієнтів.

Параметри	Свердловина	
	№6	№8
Середнє по сухій свердловині	35,93	34,0
Похибка вимірювань на сухих інтервалах	1,37	0,90
Похибка вимірювань на обводнених інтервалах	2,38	1,87

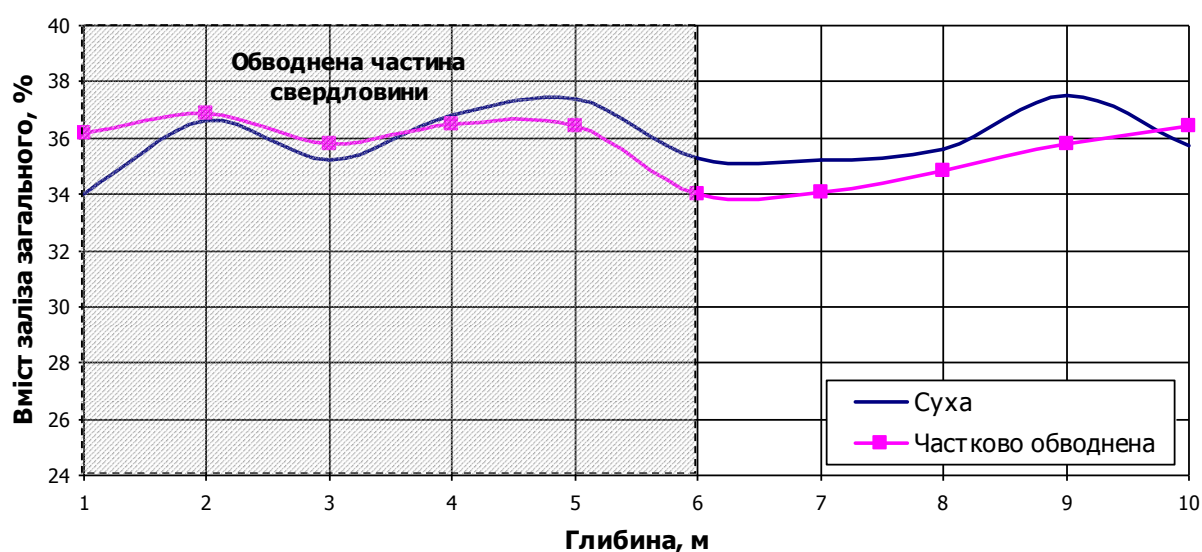


Рис. 5.39 Розподіл вмісту заліза загального у свердловині № 6 з урахуванням обводненості свердловини, зареєстрована станцією «Кар'єр-Кривбас» (метод масштабних коефіцієнтів).

Наступним етапом є визначення товщини насипного шару і визначення каверн великих розмірів.

Шар насипного ґрунту або велика каверна визначається також по характеру зміни розподілу корисних компонентів по глибині, за наступними ознаками: під час вимірювання вміст заліза загального різко збільшується, а магнітного, навпаки, зменшується (рис. 5.41).

Промислові випробування показали не лише працездатність комбінованого свердловинного пристрою в вибухових свердловинах що обводнені, але і можливість визначення рівня води у свердловинах і товщину насипного шару [90].

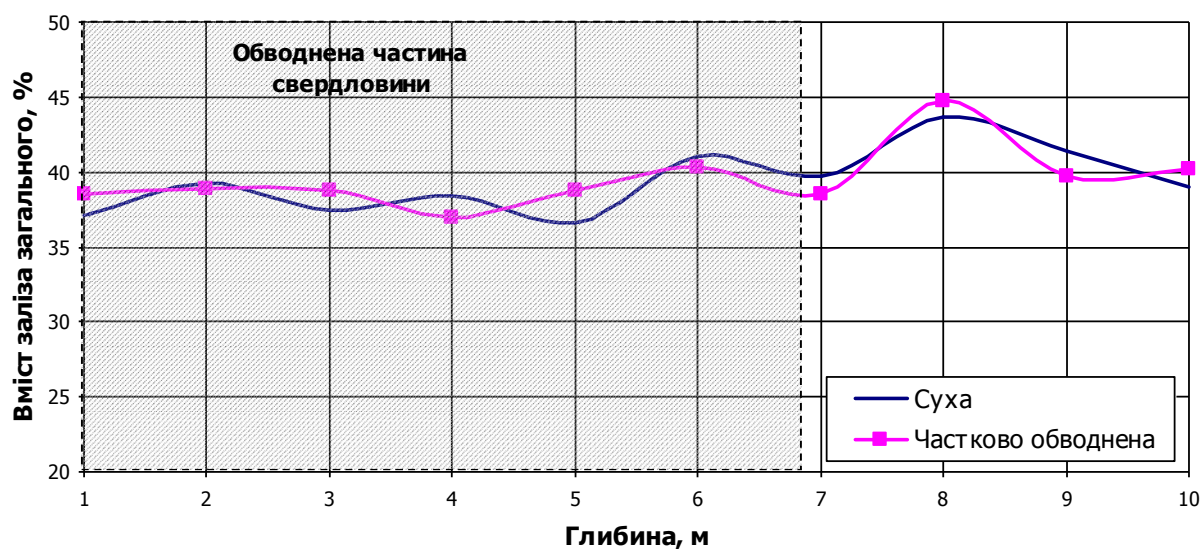


Рис. 5.40 Розподіл вмісту заліза загального у свердловині № 8 з урахуванням обводненості свердловини, зареєстрована станцією «Кар'єр-Кривбас» (метод масштабних коефіцієнтів).

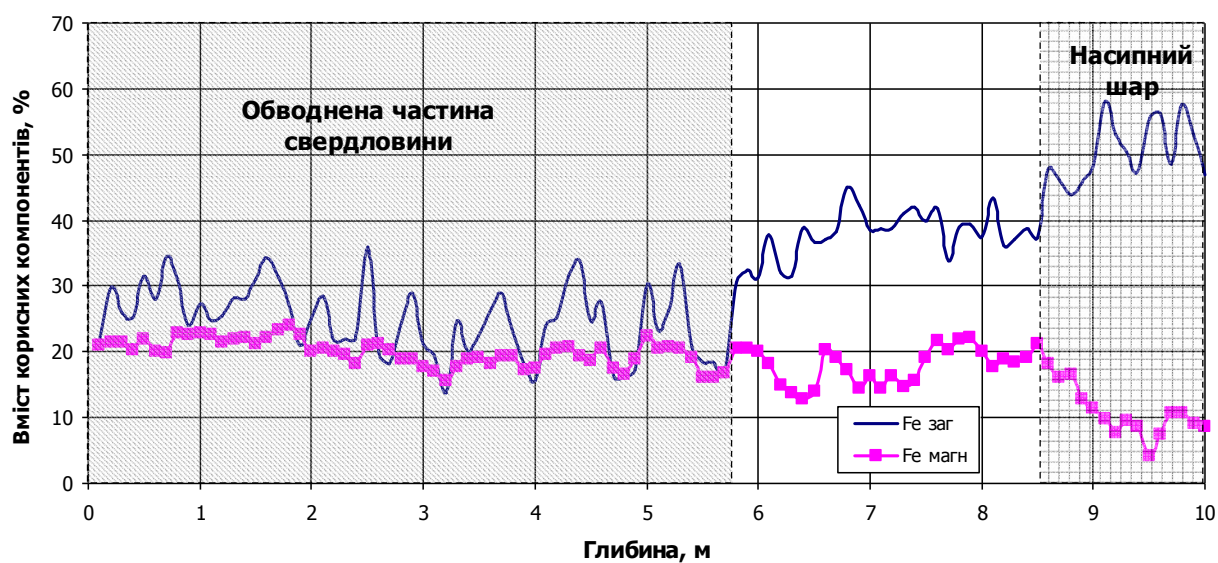


Рис. 5.41 Визначення висоти насипного шару

В цілому випробування мобільної станції довели доцільність застосування як синхронного методу контролю вмісту заліза загального і магнітного у вибухових свердловинах, так і методу масштабних коефіцієнтів для підвищення точності вимірювань заліза загального на обводнених інтервалах свердловин (рис. 5.42).

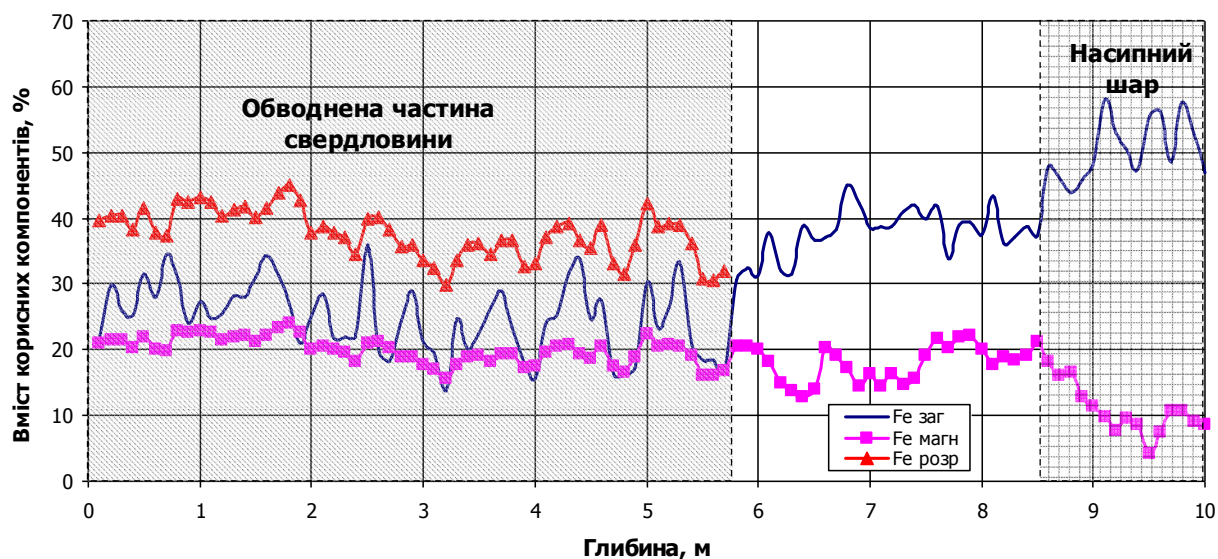


Рис. 5.42 Динаміка вмісту заліза загального і пов'язаного з магнетитом у свердловині № 6 кар'єра № 1, визначеного станцією «Кар'єр-Кривбас».

Принциповою відмінністю мобільної станції, в порівнянні із станцією «Кар'єр-1», є спосіб реєстрації і обробки інформації за допомогою бортового комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням, що дозволяє безпосередньо спостерігати діаграми розподілу вмісту корисних компонентів по глибині по мірі підйому свердловинного пристрою від забою до гирла свердловини. Результати вимірювання по свердловинах фіксуються в «пам'яті» бортового комп'ютера. Надалі ці дані піддаються подальшому перетворенню і статистичній обробці і за допомогою принтера, можуть бути відображені на папері у вигляді діаграм у вибраному масштабі, у вигляді таблиць, або в комбінованому відображенні [91-93].

В результаті математичної обробки даних вимірювань з різними системами вимірів отримано параметри, наведені в таблиці 5.4, за даними очевидно, що є тісний кореляційний зв'язок між вмістом заліза загального і пов'язаного з магнетитом, визначені різними зондовими пристроями станції «Кар'єр-1» і комбінованим свердловинним пристроєм станції «Кар'єр-Кривбас».

**Коефіцієнти кореляції і середньоквадратичне відхилення даних
вимірювань по свердловинах**

№ свердло вини	Коефіцієнти кореляції			с.к.в.		Примітки
	$Fe_{заг1}, Fe_{заг2}$	$Fe_{магн1}, Fe_{магн2}$	$Fe_{загн1}, Fe_{магн2}$	$Fe_{заг1},$	$Fe_{магн1}$	
1	0.876	0.807	0.713	0.61	0.649	
2	0.943	0.808	0.839	0.592	0.546	
3	0.915	0.854	0.855	0.517	1.136	
4	0.935	0.880	0.892	0.473	0.443	
5	0.765	0.893	0.814	0.433	0.887	
6	0.904	0.838	0.921	0.817	0.596	обводнена
7	0.873	0.979	0.743	0.429	0.226	
8	0.822	0.847	0.719	0.496	0.615	
9	0.736	0.730	0.763	0.46	0.563	

Примітка: $Fe_{заг1}$ і $Fe_{магн1}$ - данні станції «Кар'єр-Кривбас»; $Fe_{заг2}, Fe_{магн2}$ - данні станції «Кар'єр-1» (двох зондових пристроїв).

Коефіцієнти кореляції задовільні по усіх дев'яти свердловинах.

Коефіцієнт кореляції між залізом загальним і пов'язаним з магнетитом, визначені за допомогою комбінованого свердловинного пристрою, показали досить тісний зв'язок між цими компонентами, що дає основу використати цей зв'язок для визначення $Fe_{заг}$ за даними магнітного зонду у свердловинах, які обводнені, з урахуванням масштабних коефіцієнтів.

Висновки по розділу

1. Узагальнено ідею синхронного методу контролю якості, що реалізується розробкою комбінованого свердловинного пристрою, в єдиному корпусі якого розміщено апаратуру селективного гамма-гамма та магнітометричного методів;

2. Досліджено взаємозв'язок вмісту заліза загального та заліза магнетитового. Встановлено надійний кореляційний зв'язок цих величин;
3. Розроблено методи синхронного визначення вмісту корисних компонентів залізорудної сировини в свердловинах, що обводнені. Розроблено алгоритм корегування даних обводнених інтервалів свердловин;
4. Розроблено функціональну схему та узагальнений принцип роботи комбінованого свердловинного пристрою;
5. Розроблено та виготовлено макет комбінованого свердловинного пристрою. Розроблено програмне забезпечення комбінованого свердловинного пристрою, обробки відображення та збереження результатів вимірювання;
6. Проведено налагодження режимів та перевірка роботи комбінованого свердловинного пристрою в лабораторних умовах. Виконана інтеграція комбінованого свердловинного пристрою в мобільну станцію «Кар'єр-Кривбас»;
7. Проведено комплекс промислових випробовувань, визначено абсолютну похибку вимірювань, яка становить для заліза магнетитового $\pm 1,68 \%$, для заліза загального: $\pm 1,44 \%$ для сухих інтервалів свердловин, та $2,4 \%$ для обводнених;
8. Встановлено переваги використання запропонованих методів та розроблених засобів для визначення вмісту корисних компонентів в вибухових свердловинах.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, у якій поставлено та вирішено актуальне науково-практичне завдання з удосконалення методів та приладів визначення вмісту корисних компонентів в залізорудному масиві за рахунок синхронного використання штучного іонізуючого випромінювання та електромагнітних полів, що дозволило підвищити точність визначення вмісту заліза загального та магнетитового.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. На основі критичного аналізу відомих методів неруйнівного контролю якісних характеристик залізорудної сировини в умовах свердловини, а також структурного аналізу відомих пристроїв контролю якості встановлено, що для визначення вмісту заліза загального найбільш доцільним є використання гамма-гамма методу, а для заліза магнетитового – магнітометричного методу;

2. Набув подальшого розвитку індуктивний метод визначення магнітної сприйнятливості залізорудної сировини, що полягає у розробці та створенні автогенераторного індуктивного перетворювача, який дозволяє визначити магнітну сприйнятливості залізорудної сировини. За допомогою цього перетворювача встановлено кореляційний зв'язок між магнітною сприйнятливістю та вмістом заліза магнетитового, при цьому похибка вимірювань не перевищує $\pm 0,81$ %;

3. Набув подальшого розвитку селективний гамма-гамма метод для визначення вмісту заліза загального в залізорудній сировині, що полягає у розробці математичної моделі для обґрунтування оптимальних геометричних параметрів зони вимірювання. Досліджено та встановлено залежність інтенсивності інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання від вмісту заліза загального, що підтверджує можливість та доцільність

практичного використання даного методу для контролю якості, з забезпеченням точності вимірювань $\pm 0,78 \%$;

4. Обґрунтовано заходи зі зниження похибки завдяки використанню синхронних методів вимірювання на основі проведених досліджень впливу речовинного складу, атомного номеру, щільності та вологості залізорудної сировини, а також величини повітряного зазору на точність вимірювань;

5. Уперше встановлено залежність вмісту заліза загального і заліза магнетитового для другого залізистого горизонту родовища Велика Глеюватка, що забезпечило подальший розвиток методів та засобів синхронного визначення вмісту корисних компонентів;

6. Розроблено та виготовлено макет комбінованого свердловинного пристрою. Удосконалено мобільну станцію «Кар'єр-Кривбас» шляхом оснащення комбінованим свердловинним пристроєм та відповідним програмним забезпеченням; комплексом випробувань доведено його працездатність;

7. Результати проведених промислових випробувань, а також можливість практичного використання розроблених методів та пристроїв на підприємствах, підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бастан П. П. Методические рекомендации по усреднению железных руд при открытой добыче. – М.: Недра, 1979. – 255 с. / П. П. Бастан, Е. И. Ключкин. – Москва: Недра, 1973. – 121 с.
2. Гриценко А.Н. Информационное обеспечение автоматизированной системы контроля качества при добыче железорудного сырья в условиях карьеров / А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.Н. Гриценко и др. // Научный журнал «Інженерія програмного забезпечення». – 2012 – №2(10) – с. 17-25.
3. Гриценко А.Н. Планирование горных работ с использованием информации о каротаже взрывных скважин / А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2013 – №34 – с. 32-34.
4. Кашик А.С., Цуринова И.М., Вагина Е.И., Рыхлинский Н.И. / Центральная геофизическая экспедиция № 4192554 / 24-25; Бюл. №17.
5. Кривко Н.Н. Аппаратура геофизических исследований скважин. - М.: Недра, 1991, стр. 383.
6. Тихонов Б.Н., Сибирская Н.К., Федоров С.Ф. аппаратура РИМВ-1 для опробования магнетитовых руд при эксплуатационной разведке и отработке месторождений. - Горный журнал, 1977, № 5. с. 15-17.
7. Пат. №119777 Україна, G01V 5/00. Пристрій оперативного контролю вмісту корисного компонента у мінеральній сировині / [А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.М. Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник та ін.]; заявл. 05.04.17; опубл. 10.10.17; Бюл. №19.
8. Пат. №123234 Україна, G01V 5/12. Свердловинний пристрій для селективного гамма-гамма каротажу / [А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.М. Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник та ін.]; заявл. 05.04.17; опубл. 26.02.2018; Бюл. №4.
9. Пат. №74623 Україна, G01V 5/00. Пристрій оперативного контролю вмісту корисного компонента в мінеральній сировині / [А.А. Азарян, А.М.

Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник, Г.М. Лісовий та ін.].; заявл.16.03.12; опубл. 12.11.12; Бюл. №21.

10.Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. -М.: Мир, 1974. -Вып. 1. -406 с.

11.Гамма методы в рудной геологии /А.П. Очкур, И.В. Томский, Ю.П. Яншевский и др. -Л.: Недра, 1976. -407 с.

12.Кохов Е.Д., Лаврентьев Ю.Д., Мамикопян С.В. Абсорбционные РР приборы технологического контроля состава вещества //Изотопы в СССР. - 1974. -№ 34. -С. 41.

13.Леонов С.В., Развозжаев Ю.И., Федоров Ю.О. Перспективы рентгенорадиометрического обогащения полезных ископаемых: //Цветные металлы. -1981. -№ 7. -С. 92-93.

14.Леман Е.П., Рыбакова Т.Г. Физико-теоретические основы РР сепарации руд //Обогащение руд. -1988. -№ 1. -С. 6-9.

15.Ревнивцев В.И., Леман С.П., Коротков М.И. Рентгенорадиометрический метод в комплексной системе управления качеством руд. //Обогащение руд. -1983. -№ 5. -С. 24-26.

16.Рентгенорадиометрический комплекс для многокомпонентного анализа руд и продуктов технологической переработки полиметаллических месторождений /К.И. Щекин, В.Ф. Кузин, Н.Н. Михайленко и др. - В кн.: Рентгеновские методы анализа в научных исследованиях и контроле производственных процессов. Тез. докл. IV Зон. семинара. -Красноярск., ИСХА СО АН СССР, 1983. -С. 137-139.

17.Хайдаров А.А. Ядерно-геофизические методы анализа горных пород и руд. -Ташкент: ФАН УзССР, 1969. -212 с.

18.Возженников Г.С. Активационный анализ в рудной геофизике. -М.: Недра, 1965. -72 с.

19.Ревнивцев В.И., Крапивский Е.И., Волков А.А. Применение нейтронных методов сортировки руд цветных и редких металлов //Обогащение руд. -1987. -№ 2. -С. 4-9.

20.Мокроусов В.А., Лилеев В.А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. -М., 1979. -192 с.

21.Филиппов Е.М. Прикладная ядерная геофизика. -М.: Изд-во АН СССР, 1962. -580 с.

22.Гриценко А.Н. Оперативный контроль и управление качеством при добыче и переработке минерального сырья / А.А. Азарян, В.А. Азарян, В.В. Дригата и др. –ОКТАН PRINT, Прага:2020 -500с.

23.К вопросу использования ядернофизических методов для технологического опробования руд в отбитой массе /Ю.Г. Товстенко, А.Ю. Большаков, В.Н. Комлев и др. В кн.: Повышение эффективности подземной разработки рудных месторождений. -Апатиты, 1975. -С. 33-38.

24.Старчик Л.П., Пак Ю.Н. Ядернофизические методы контроля качества твердого топлива. -М.: Недра, -1985. -223 с.

25.Armco's Near Stream X-ray and Particle Size Analyzers. Engineering Mining Journal, 1984, vol. 185, N 8, p. 82-35.

26.Nargolwalla S., Seigel H.O. In-situ mineral Deposit Evaluation with the Metalogstem "Can Mining J". -1977, N 4, p. 75-76, 84-85.

27.Автоматический контроль качества минерального сырья /А.А. Азарян, В.Ю. Зубкевич, Г.Н. Лисовой и др. -Киев, 1989. -91 с. - Деп. в УкрНИИНТИ. 13.10.89, № 2202.

28.Арцыбашев В.А. Ядерно-геофизическая разведка. -М.: Атомиздат, 1980. -321 с.

29.Влияние физических свойств горных пород на степень поглощения гамма-излучения /Г.М. Малахов, А.Р. Соцкий, Р.С. Азарян, А.А. Азарян //Известия вузов. Горный журнал. -1973. -№ 6 -С. 3-6.

30.Влияние физических свойств горных пород на процесс поглощения гамма-излучения /Г.М. Малахов, А.Р. Соцкий, А.А. Азарян, Р.С. Азарян //Известия вузов. Горный журнал. -1973. -№ 6. -С. 3-6.

31.Основы экспериментальных методов ядерной физики /А.И. Абрамов, Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич и др. -М.: Атомиздат, 1977. -116 с.

32.Пшеничный Г.А., Очкур А.П., Гаганов Д.А. Применение радиоизотопного рентгенофлуоресцентного анализа для определения вещественного состава горных пород и руд в движении //Атомная энергия. -1970. - № 1. -С. 67-68.

33.Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложение. -М.: Мир, 1972. -316 с.

34.Максимов В.А., Козлов Г.Г., Козлова Л.Д. Применение ядерно-физических приборов для контроля качества руд и их сортировки //Обогащение руд. -1979. -№ 5. -С. 34-36.

35.Куркин В.М., Меньшанин Г.И. Автоматический контроль в комплексной системе управления качеством продукции по всему технологическому циклу железорудных горных предприятий //Горный журнал. -1976. -№ 5. -С. 8-10.

36.Пирогов Б.И., Пирогова В.В. Минералогическое исследование железных и марганцевых руд. –М. Недра, 1973. 216 с.

37.Марюта А.Н., Младецкий П.К., Новицкий П.А. Контроль качества минерального сырья / К. : Техніка, 1976. – 220 с.

38.Пат. №121880 Україна, G01V 3/28. Пристрій для магнітного каротажу геофізичних свердловин / [А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.М. Гриценко, В.В. Дрыга, Д.Ю. Мірошник та ін.]; заявл.07.04.17; опубл. 26.12.2017; Бюл. №24.

39.Дрыга В.В. Непрерывный контроль качества магнетитовых руд на ленточных конвейерах в условиях горно-обогатительных комбинатов / В.В. Дрыга /Диссертация Кривой Рог 2013. – 233 с.

40.Gritsenko A. Research of opportunities for increasing control accuracy of femag content in blastholes// A. Azaryan, A. Trachuk, D. Shvets, A. Gritsenko// 14-th international conference “Science and society”: Hamilton, Canada, 20 september 2019 // Materials conference Hamilton – 2019 - pp. 4-9.

41.Гриценко А.Н. Разработка измерительного канала для оперативного контроля содержания железа магнітного во взрывных скважинах / А.А.

Азарян, А.А. Трачук, А.Н. Гриценко, Д.В. Швец // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2019 -№1 – с. 138-145.

42.Алексеев А.Г. Применение прецизионных аналоговых интегральных схем / А.Г. Алексеев, Е.А. Коломбет, Г.И. Стародуб. – М. : Радио и связь, 1981. -224 с.

43.Гаврилюк М.А. Электронные измерители С, L, R / М.А. Гаврилюк, Е.П. Соголовский. – Львов : Вища школа, 1978. – 134 с.

44.Афанасьев Ю.В. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки / Ю.В. Афанасьев. – Л. : Энергия, 1972. -272 с.

45.Арш Э. И. Автогенераторные методы и средства измерений / Э.И. Арш. – М. : Машиностроение, 1979. – 256 с.

46.Дьяконов Д.И., Леонтьев Е.И., Кузнецов Г.С. Общий курс геофизических исследований скважин. М., «Недра»,1977. -432 с.

47.Горшков Г.В. Проникающее излучение радиоактивных источников / Г.В. Горшков.- Л. : Наука, 1967. -396 с.

48.Сидоренко В.В., Кузнецов Ю.А., Оводенко А.А. Детекторы ионизирующих излучений. – Л.: Судостроение, 1984. – 240 с.

49.Belluscio M., De Leo R. Pantaleo A., Vox A., Efficiencies and response functions of NaJ(Tl) crystals for gamma rays from thick disk sources., Nuclear instrument and methods., Volume 118, №2., 1974.

50.Цирлин Ю.А., Дайч А.Р., Радыванюк А.М. Сцинтиляционные блоки детектирования. –М. :Атомиздат, 1978. 124 с.

51.Соболева Н.А., Меламид А.Е. Фотоэлектронные приборы. М., «Высшая школа», 1974 -376 с.

52.Уткин В.И., Стариков В.Н., Ермаков В.И., Якушев К.К. Применение метода Монте-Карло для задач селективного ГТМ. Физика земли. № 9, с. 92-96,1974.

53.Арцыбашев В.А., Иванюкович Г.А. Связь между конструкцией и свойствами зондов в гамма-гамма каротаже. В сб. Ядерная геофизика. Выпуск 9., М.: Недра, 1971.

54.Гриценко А.Н. Интегральный поток интенсивности рассеянного гамма-излучения как функция от параметров геометрии измерения / А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.Н. Гриценко, А.А. Трачук // Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Modern Scientific Achievements and Their Practical Application" (October 31, 2017, Dubai, UAE). сб. тр. №11(27), Vol.1, November 2017. – С. 18–24.

55.Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 132 с.

56.A. Gritsenko Using the intensity of absorber gamma radiation to control the content of iron in ore / A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, V. Serebrennikov, D. Svets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkiv, 2019 – №3/5(99)2019. –p. 29-35.

57.Gritsenko A. N. Model gamma radiation in the interaction with rock formation / A.A. Azaryan, A.N. Gritsenko, A.A. Trachuk та ін. // International Journal of Robotics and Automation. – 2019 - Vol.8, No.4 – pp. 269-276.

58.Поляченко А.Л., "Численные методы в ядерной геофизике", -М. Энергоатомиздат, 1987. - 152 с.

59.Гриценко А.Н. Исследование экспресс-анализа содержания общего железа в руде с использованием гамма-излучения / А.А. Азарян, А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2016 – №43 – с. 79-84.

60.A. Gritsenko Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction / A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, D. Svets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkiv, 2018 – №5/5(95)2018. –p. 13-19.

61.Отчет по теме 211-А: "Разработка методики комплексного опробования взрывных скважин на карьерах Кривбасса" Т.1 [Тимофеев Е.В., Алешин Н.С. и др] - Ленинград, ВИРГ, 1969г.

62.Очкур А.П. Использование эффекта отражения гамма-лучей для

оценки содержания некоторых металлов в рудах. Вопросы рудной геофизики / А.П. Очкур, Г.А. Пшеничный, 1965. вып. № 5, С. 104 - 108.

63.Экспериментальная ядерная физика / Под ред. Э.Сегре, пер. с англ. Т.3. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 684 с.

64.Литвинцев С.А. Методика автоматизированной обработки и интерпретации панорамных изображений стенок скважин / С.А. Литвинцев // Международная геофизическая конференция и выставка по разведочной геофизике (Москва-92). - Сб. реф. - Б.м. – М. - 1992. – 440 с.

65.Гриценко А.Н. Исследование и учет влияния воздушного зазора между датчиком и горной породой на точность определения содержания железа общего гамма-гамма методом / А.Н. Гриценко, В.В. Дрыга // Сборник научных трудов «Качество минерального сырья». – 2014 – с. 238-247.

66.Бастан П. П. Теория и практика усреднения руд. –М.: Недра, 1979. – 255 с. / П. П. Бастан, Е. И. Азбель, Е. И. Ключкин. – Москва: Недра, 1979. – 255 с.

67.Vaish J.P. Geophysical well logging. Asian Books Private Limited., 1997.

68.Вейнсберг А.К., Сараев А.К. Определение магнитных свойств горных пород по магнитно-разведочным и каротажным данным // Петрофизика: Справочник геофизика. М.: Недра, 1992. С. 56-58.

69.Тимофеев Е.В., Алешин Н.С. Колесник А.В. "Методические рекомендации по использованию аппаратуры "Карьер" для опробования рудных блоков по взрывным скважинам при карьерной отработке магнетитовых месторождений криворожского типа", 1972г., Ленинград, ВИРГ.

70.Пат. №85059 Україна, G01V 5/00. Пристрій для каротажу свердловин / Гриценко А.М. ; заявл.26.04.13; опубл. 11.11.13; Бюл. №21.

71.Пат. №118167 Україна, G01V 5/04. Пристрій синхронного гамма-гамма-каротажу з електронним інклінометром / [А.А. Азарян, А.М. Гриценко, Д.Ю. Мірошник, С.В. Пилипенко, Ю.Є. Цибулевський та ін.];

заявл.13.02.17; опубл. 25.07.17; Бюл. №14.

72.Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистике. М.: Высшая школа, 1975, С.330-33.

73.Гутер Р.С., Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта - М. Наука, 1970, 432 с.

74.Справочник по теории вероятностей и математической статистики. Под редакцией академика АН УССР В.С.Каралюка.- Киев, Наукова думка, 1978, 583 с.

75.Отчет о геологоразведочных работах на месторождении железистых кварцитов Большая Глееватка за 1969-1979 гг. /книга 1, 2. Криворожская геологоразведочная экспедиция "Кривбассгеология". Кривой Рог, 1979.

76.Гриценко А.Н. Сравнительный анализ законов распределения железа связанного с магнетитом / А.Н. Гриценко // Журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность». – 2012 - №2. - с. 74-75.

77.Гриценко А. Н. Методы синхронного каротажа сухих и обводненных скважин / А.А. Азарян, А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького технічного університету». - 2011 - №27. – с. 258-262.

78.Bertozzi W., Ellis D.V., Wahl J.S. The physical foundation of formation lithology logging with gamma rays. Geophysics, vol. 46, no. 10, 1981, p.1439-1455.

79.Schultz W.E., Nunley A., Kampfer J.G., Smith H.D. Dual-detector lithology measurements with a new spectral density log. – 26th annual SPWLA symposium, June 1985.

80.Саранцев С.Н. Единая идеология стабилизации спектрометров гамма-излучений различной природы // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2003. Вып. 102. С.84-98.

81.Уткин В.И. О стабильности сцинтилляционных датчиков в режиме интегральных измерений. Сб. Разведочная геофизика, вып. 40, Недра, 1970. – с. 21-27.

82.Уткин В.И. Спектр рассеянного гамма излучения на малых расстояниях от источника. Атомная энергия, 1970,29, вып. 1.

83.Гриценко А.Н. Информационно-измерительная Система оперативного использования данных каротажа / А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2012 – №31 – с. 218-220.

84.Инструкция по проведению геофизических исследований рудных скважин / под ред. Е. П. Лемана, А. П. Савицкого. – СПб. : ВИРГ-Рудгеофизика, 2000. – 414 с.

85.Скважинная и шахтная рудная геофизика : справочник геофизика : в 2 кн. / под ред. В. В. Бродового. – М. : Недра, 1988. Кн. 1. – 320 с. ; Кн. 2. – 440 с.

86.Гриценко А.Н. Исследование взаимосвязи показаний ручного и комбинированного каротажного зонда при каротаже буровзрывных скважин / А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2015 – №40 – с. 73-77.

87.Элланский М.М. Петрофизические основы комплексной интерпретации данных геофизических исследований скважин. Методическое пособие. М.: ГЕРС, 2002, 229 с.

88.Гуфранов М.Г. Развитие интерпретационных моделей ГИС // Каротажник, 1996, вып. 27, с. 30-35.

89.Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М. : Недра, 1982, 448 с.

90.Метрологическое обеспечение геофизических исследований скважин/ А.М. Блюменцев, Г.А. Калистратов, В.М. Лобанков, В.П. Цирюльников// М.: Недра. -1991 – 266 с.

91.Гриценко А.Н. Методика обработки данных по каротажу / А.В. Швыдкий, А.В. Черкасов, А.Н. Гриценко // Сборник научных трудов «Качество минерального сырья». – 2011 – с. 216-221.

92.Гриценко А.Н. Информационно-измерительная Система оперативного использования данных каротажа / А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2012 – №31 – с. 218-220.

93.Калинченко В.М. Математическое моделирование и прогноз показателей месторождений: Справочник. – М.: Недра. – 1993. -319 с.

Додаток А

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Утверждаю:

директор

ГП «Укрчерметгеология»

Бойко С.С.

2016 г.

Акт

внедрения мобильного каротажного зонда и станции «Карьер-Кривбасс»

19 апреля 2016 г.

г. Кривой Рог

Комиссия в составе:

Николау А.Г. – Начальник Криворожской ГПП, председатель комиссии

Члены комиссии:

Азарян А.А. – д.т.н., профессор, руководитель проблемно-отраслевой научно исследовательской лаборатории ГВУЗ «Криворожский технический университет» (КНУ)

Цибулевский Ю.Е. – к.т.н., доцент

Никитин А.А. – ведущий геофизик Криворожской ГПП

Гриценко А.Н. – научный сотрудник ГВУЗ КНУ

Черкасов А.В. – старший научный ГВУЗ КНУ

Швыдкий А.В. – научный сотрудник ГВУЗ КНУ

проводила испытания мобильного каротажного зонда и станции «Карьер-Кривбасс».

В качестве каротажного зонда использовался разработанный проблемной лабораторией КНУ комбинированный каротажный зонд для оперативного контроля содержания железа общего и железа связанного с магнетитом.

Целью испытаний комбинированного каротажного зонда и мобильной каротажной станции «Карьер-Кривбасс» явилось установление технических характеристик и целесообразность внедрения новой техники в производство.

Испытания каротажной станции проводились в условиях КГТП (10.03.16 г.), в карьерах ПАО «Центральный горно-обогатительный комбинат» (май-апрель 2016 г.) и ПАО «Южный горно-обогатительный комбинат» (апрель 2016 г.).

По результатам всех испытаний мобильной каротажной станции «Карьер-Кривбасс» установлено, что коэффициент корреляции между данными геологического опробования и результатами каротажной станции не меньше 0,81. Абсолютная погрешность каротажа при этом по общему железу и железу связанному с магнетитом составляет в среднем 1,73% и 1,51% соответственно.

Установлено, также, возможность каротажа обводненных скважин с использованием радионуклида Америций-241 активностью $3,7 \times 10^9$ Бк при базе зонда – 90 мм.

Внедрение станции «Карьер-кривбасс» на ГОКах Украины заменяет шламовое опробование и химический анализ проб на железо общее и железо связанное с магнетитом, во взрывных сухих, и обводненных скважинах.

Расчетный экономический эффект по всем ГОКах Кривбасса составляет 1729,68 тыс. грн. в год.

Председатель:



Николаев А.Г.

Члены комиссии:



Азарян А.А.



Гриценко А.Н.



Никитин А.А.



Черкасов А.В.



Цыбулевский Ю.Е.



Швыдкий А.В.

Утверждаю:

Главный инженер

ГОКа «Укрмеханобр»

ПАО «ММК им. Ильича»

Майданик С.Я.



2016 г.

АКТ

**внедрения комбинированного каротажного зонда установленного на
мобильной каротажной станции «Карьер-Кривбасс»**

«04» апреля 2016 г.

г. Кривой Рог

Целью испытаний новой мобильного каротажного зонда и станции «Карьер-Кривбасс» является установление возможности внедрения новой техники в условиях ГОКа «Укрмеханобр», для каротажа сухих и обводненных взрывных скважин.

Присутствовали:

Сердюк Ю.А. - нач. производственно-технического бюро карьера «Северный»;

Новицкая А.В. - главный геолог карьера «Северный»;

Азарян А.А. - руководитель проблемно-отраслевой лаборатории (ПОНИЛ)

ГВУЗ Криворожский национальный университет (КНУ);

Цыбулевский Ю.Е. – к.т.н., доцент ПОНИЛ КНУ;

Гриценко А.Н. – научный сотрудник ПОНИЛ КНУ;

Черкасов А.В. - научный сотрудники ПОНИЛ КНУ

В качестве каротажного зонда использовался разработанный в ПОНИЛ КНУ комбинированный каротажный зонд для оперативного контроля содержания общего железа и железа связанного с магнетитом.

Каротажная станция «Карьер-Кривбасс» эксплуатируется на карьере «Северный» ГОКа «Укрмеханобр» ПАО «ММК им. Ильича» с 2007 года. За

период декабрь 2015 года – март 2016 года станция была модернизирована путём оснащения её новым комбинированным каротажным зондом и обновленным программным обеспечением компьютера оператора, что позволило выполнять каротаж обводненных скважин, с высокой точностью.

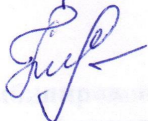
Внедрение станции «Карьер-Кривбасс» на ГОКах Украины позволяет сократить объемы шламового опробования и химических анализов проб на железо общее и железо связанное с магнетитом, в сухих и обводненных взрывных скважинах шарошечного бурения на 80%

Сердюк Ю.А.



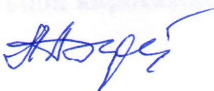
нач. ПТБ карьера «Северный»

Новицкая А.В.



Главный геолог карьера «Северный»

Азарян А.А.



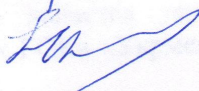
Руководитель проблемно-отраслевой лаборатории КНУ

Гриценко А.Н.



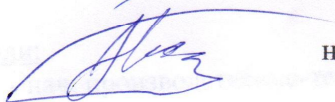
научный сотрудник ПОНИЛ КНУ

Цыбулевский Ю.Е.



научный сотрудник ПОНИЛ КНУ

Черкасов А.В.



научный сотрудник ПОНИЛ КНУ

Затверджую:

Проректор з наукової роботи
ДВНЗ «Криворізького національного університету»
доктор технічних наук, проф.

Моркун В.С.

«22» квітня 2016 р.



АКТ

**впровадження в навчальний процес
пакета методики і програмного забезпечення
для автоматизації робочого режиму комбінованого каротажного зонду.**

Рівень сучасної геофізичної техніки забезпечує можливість оперативного контролю вмісту корисних компонентів у гірничих свердловинах під час розвідки та експлуатації у кар'єрах та на поверхні. Особливо такий контроль необхідний для каротажу, коли необхідно визначити міцність породи, яку перетинають ці свердловини та рівень води у самих свердловинах.

Перспективним методом каротажу є комбінований метод, у якому одночасно застосовані гамма-гамма та електромагнітної хвилі, що реєструються відповідними датчиками.

Широке розповсюдження цього методу стримується відсутністю відповідної апаратури комбінованих методів каротажу та методик для їхнього впровадження.

ДВНЗ Криворізький національний університет має великий досвід у розробці приладів радіаційного контролю якості гірничої сировини, які впроваджені на шахтах, кар'єрах та збагачувальних фабриках Кривбасу.

Науковим співробітником Проблемної науково-дослідної лабораторії ДВНЗ КНУ Гриценко А.М. розроблено методику двофакторного аналізу гірничої сировини та апаратуру для його виконання за показаннями датчиків гамма-гамма та електромагнітного каротажу.

Ця методика заснована на математичних моделях взаємодії гамма та електромагнітних полів з породами, які перетинають вибухові свердловини.

Отримані у дисертаційній роботі теоретичні і практичні результати використовуються під час проведення лекційних та практичних занять, а також у процесі виконання курсового та дипломного проектування студентами ДВНЗ «Криворізький

національний університет» за спеціальністю «Програмне забезпечення автоматизованих систем»

Розроблений А.М. Гриценко комплект методик і прикладних програм для автоматичного контролю якості мінеральної сировини у вибухових свердловинах включає

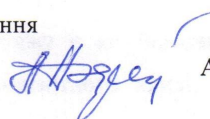
- Методику калібрування датчиків гамма-гамма та магнітного випромінювання, а також обчислення вмісту корисних компонентів у сухих та обводнених свердловинах.
- Методику розрахунків кількості вибухівки у свердловинах залежно від результатів каротажу.

Ці наукові розробки ДВНЗ «Криворізький національний університет» використовуються на кафедрі «Моделювання та програмного забезпечення» при підготовці методичного забезпечення і викладання дисциплін за спеціальністю «Програмне забезпечення автоматизованих систем».

Завідувач кафедрою

моделювання та програмного забезпечення

доктор технічних наук, професор

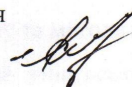


Азарян А.А.

Доцент кафедри

моделювання та програмного забезпечення

кандидат технічних наук



Котов І.А.

Додаток Б

**Результати хімічного аналізу проб руди ПАТ «Центральний гірничо-
збагачувальний комбінат»**

№ проби	Fe _{заг}	Fe _{магн}
1	42.4	39.87
2	42.4	39.87
3	44.9	44.38
4	40.91	37.19
5	36.93	30.01
6	38.45	32.75
7	37.92	31.8
8	30.53	18.48
9	30.61	18.62
10	32.46	21.95
11	33.26	23.3
12	32.11	21.33
13	37.82	31.62
14	35.21	26.91
15	35.24	26.97
16	31.38	20.01
17	29.6	16.8
18	31.6	20.41
19	36.1	28.52
20	32.6	22.21
21	34.3	25.27
22	37	30.14
23	34.6	25.81
24	39.1	33.92
25	36.9	29.96
26	33.4	23.65
27	34.6	25.81
28	32.9	22.75
29	30.7	18.78
30	34.07	25.81
31	32.39	22.93
32	33.8	25.09
33	31.71	22.39
34	32.05	21.22
35	36.14	28.59
36	31.03	19.38
37	34.54	25.7

№ проби	Fe _{заг}	Fe _{магн}
38	39.25	34.19
39	38.95	33.65
40	34.03	24.79
41	35.21	26.91
42	34.1	24.91
43	29.36	16.37
44	29.17	16.03
45	32.99	22.91
46	33.39	23.63
47	34.07	24.86
48	38.64	33.09
49	37.33	30.73
50	31.24	19.76
51	30.94	19.22
52	31	21.96
53	36.1	30.06
54	36.08	28.48
55	34.67	25.94
56	38.51	32.86
57	37.02	30.17
58	35.78	27.94
59	35.35	27.16
60	34.31	25.29
61	34.27	25.22
62	36.5	29.24
63	43.7	42.21
64	45	44.56
65	39.5	34.64
66	44.9	44.38
67	44.5	43.66
68	35.9	28.16
69	35.6	27.62
70	38.5	32.84
71	43.5	41.85
72	44	42.75
73	42	39.15
74	33.5	23.83

№ проби	Fe _{заг}	Fe _{магн}
75	32.3	21.67
76	37.4	30.86
77	41.9	38.97
78	35.6	27.62
79	32.2	21.49
80	31.9	20.95
81	33.6	24.01
82	42.69	40.39
83	37.46	30.97
84	41.09	37.51
85	32.31	21.69
86	36.53	29.29
87	40.75	36.9
88	36.92	30
89	33.09	23.09
90	37.1	31.22
91	37.7	31.58
92	41.1	37.53
93	41.7	38.61
94	42.3	40.95
95	40.68	38.61
96	39.84	36.83
97	38.12	33.74
98	40.5	38.43
99	42.75	42.03
100	37.77	33.02
101	42.35	41.32
102	40.62	36.66
103	38.91	33.58
104	37.2	30.5
105	39	33.74
106	36.1	28.52
107	33.13	23.16
108	32.01	21.15
109	31.46	20.15
110	29.09	15.88
111	36.9	29.96
112	32.59	22.19
113	36.9	29.96
114	34.68	25.96
115	35.04	26.61
116	32.2	21.49
117	27	12.12
118	32.8	22.57
119	38.2	32.3

№ проби	Fe _{заг}	Fe _{магн}
120	41.4	38.07
121	36.8	29.78
122	29.1	15.9
123	33.7	24.19
124	28.1	14.1
125	28.91	15.56
126	26.5	11.15
127	32.31	21.61
128	36.6	29.33
129	38.5	32.75
130	37	30.05
131	35.3	27.01
132	39.4	34.37
133	39.9	35.27
134	36.9	29.87
135	37.5	31.13
136	35.1	36.63
137	33.4	23.57
138	37	30.05
139	35.2	26.81
140	30.4	18.17
141	28.1	14.03
142	36.7	29.6
143	35.3	27.07
144	36.2	28.7
145	33.2	23.29
146	36.7	29.6
147	36.8	29.72
148	34	24.73
149	33.5	23.83
150	29.6	16.8
151	29.3	16.26
152	28.7	15.18
153	43	40.95
154	33.7	24.19
155	36	28.34
156	35.4	27.25
157	41.8	38.79
158	38.8	33.38
159	41	37.35
160	42.5	40.05
161	44.3	43.3
162	42	39.15
163	37.5	31.04
164	30.7	18.78

№ проби	Fe _{заг}	Fe _{магн}
165	30.3	18.06
166	32.6	22.21
167	29.9	19.51
168	37.14	31.76
169	31.21	22.21
170	38.53	33.74
171	36.39	29.42
172	37.63	32.3
173	39.36	35.01
174	34.25	25.99
175	36.6	30.14
176	34.37	26.35
177	34.74	27.08
178	29.31	17.88
179	29.8	17.6
180	34.3	25.26
181	37.2	30.5
182	36.3	28.88
183	37.1	30.32
184	38	31.94
185	35.7	27.8
186	33.6	24.01
187	30.6	17.07
188	29.6	15.65
189	35.7	26.68
190	41.8	37.7
191	37.8	30.32
192	38.2	31.06
193	33.8	23.02
194	34.2	24.01
195	27.67	13.32
196	35.27	27.02
197	31.17	19.63
198	33.5	23.83
199	35.5	27.43
200	40.7	36.81
201	43.2	41.31
202	41.5	38.25
203	33.5	23.83
204	36.1	28.52
205	34.4	25.45
206	37.8	31.58
207	32.5	22.03
208	25.8	9.95
209	28.7	15.18

№ проби	Fe _{заг}	Fe _{магн}
210	29.4	16.44
211	29.3	16.26
212	32.62	22.24
213	33.63	24.07
214	39.13	33.98
215	35.44	27.33
216	36.41	28.08
217	34.16	25.02
218	33.95	24.64
219	34.41	25.47
220	34.48	25.6
221	32.25	21.58
222	27.7	13.38
223	36.1	28.52
224	36.6	29.42
225	37.2	30.5
226	35.2	26.9
227	34.4	25.45
228	40.1	35.73
229	36.6	29.42
230	38.8	23.31
231	37.9	24.31
232	31.1	18.14
233	35.5	20.61
234	37.4	23.36
235	29.2	14.31
236	31.7	18.36
237	29.4	13.07
238	25.7	12.16
239	24	12.06
240	22.8	12.42
241	22.8	11.58
242	23.8	11.68
243	23.4	10.19
244	22.2	9.81
245	28.3	12.06
246	20.9	13.51
247	26	12.99
248	34.8	26.17
249	33.2	23.29
250	35.2	26.9
251	35.1	26.71
252	30.1	17.7
253	31.1	19.5
254	36.2	28.7

№ проби	Fe _{заг}	Fe _{магн}
255	36.6	29.42
256	38.6	33.02
257	35.5	27.43
258	35.6	27.62
259	31	19.32
260	35.9	28.16
261	39.2	34.1
262	37.9	31.76
263	44.8	44.2
264	40.6	36.63
265	42.9	40.77
266	33.1	23.11
267	33	22.93
268	34.9	26.35
269	35.8	27.98
270	32	21.13
271	31.6	20.4
272	32.2	18.3
273	35.1	17.4
274	37.4	27.15
275	36.3	22.35
276	33.5	22.5
277	35.5	26.46
278	38.1	28.5
279	31.8	22.65
280	34.7	27.06
281	25.6	16.26
282	28.5	20.1
283	29.35	20.1
284	30.2	20.46
285	34	22.26
286	28.9	19.11
287	37.7	27.36
288	40.8	27.51
289	35.4	22.65
290	36.4	24.45
291	35.5	24.3
292	33.7	25.11
293	38.8	31.95
294	31.8	22.35
295	37.2	31.58
296	31.6	25.8
297	29.9	22.28
298	28.7	20.63
299	33.3	27.3

№ проби	Fe _{заг}	Fe _{магн}
300	38.4	28.65
301	39.8	31.5
302	40.5	33.75
303	39.8	33.1
304	45.8	38.85
305	38.8	32.4
306	26.6	15
307	31.2	18.75
308	34.8	23.64
309	34.2	26.34
310	37.9	29.55
311	35.1	28.95
312	35.1	29.34
313	27.8	13.05
314	31.7	23.85
315	32.9	24.15
316	27.3	9.15
317	31.5	15.54
318	37.9	30.15
319	28.5	10.29
320	29.5	11.19
321	29.8	15.54
322	35.8	26.49
323	31.9	19.65
324	35.4	26.19
325	31.9	20.19
326	37	32.19
327	36.1	26.94
328	31.5	22.31
329	35.5	29.34
330	31.8	22.5
331	32.9	19.65
332	33	19.95
333	37.3	27.3
334	40.5	28.2
335	35.1	27.3
336	30.5	17.7
337	29.9	14.1
338	30.2	15
339	34.8	13.5
340	31.1	19.2
341	35.2	25.8
342	35.7	25.92
343	36.3	27
344	38.4	33

№ проби	Fe _{заг}	Fe _{магн}
345	31.7	24.9
346	32.3	24.45
347	36.5	28.2
348	34.2	27.9
349	34.5	27.45
350	34.6	28.65
351	31.5	21.9
352	34.9	26.7
353	34.3	25.35
354	35.15	26.85
355	36	28.35
356	36.1	27.45
357	38.2	30.15
358	40.5	31.5
359	35.1	28.5
360	34.5	26.4
361	30	17.25
362	33.9	25.67
363	32	23.83
364	38.5	30.89
365	37.1	31.12
366	30.3	19.37
367	37.5	28.38
368	38	31.94
369	35.1	30.37
370	35.3	29.42
371	32	26.13
372	34	27
373	34.7	29.05
374	32.6	27.37
375	33	26.39
376	28.2	20.96
377	29.5	23.31
378	29.4	15.98
379	30.1	16.52
380	31.4	23.72
381	32.4	23.97
382	31.1	22.86
383	37.1	34.13
384	34.1	27.94

Додаток В

Програмне забезпечення комбінованого свердловинного пристрою

Лістинг головного модулю програмного забезпечення нижнього рівня.

```
// GammaMagnZond firm 1.2
// ПРОГРАМА НИЖНЬОГО РІВНЯ КОМБІНОВАНОГО СВЕРД ПРИСТ. (ГАММА І МАГНІТНОГО)

// розроблено під ImageCraft IDE for ICCAVR. ATMEGA128 16MHz
// (c)2017
// main.c

#include "platform.h"
// platform.h - основные определения для выбранной платформы:
// тип кристалла (#include<ioXXXXX.h>), тактовая частота СК, назначение портов (PORT,DDR,PIN..)
// +доопределения типов данных (uchar,...) и макросы для битовых операций (SETBIT(),...)
#include "delay.h"
#include "modbus.h"
#include "onewire.h"
#include "ds18b20.h"
#include "proc.h"

//Температурная коррекция:
#define NORMTEMP 20 //нормальная температура, град.С, при которой отсутствует темп.коррекция

//глоб. переменные для измерения интенсивности (N) гамма-датчика:
enum {CS_WAITSTOP,CS_WAITSTART,CS_RUNNING} CntState=CS_WAITSTOP; //состояние процесса счета импульсов
uint T1_OVF_cnt,T2_OVF_cnt; //количество переполнений внутренних счетчиков-таймеров T1,T2

//глоб. переменные для измерения периода колебаний (MagnT) магнитного датчика:
enum {MS_WAITSTOP,MS_STOPPED,MS_WAITSTART,MS_RUNNING} MagnState=MS_STOPPED; //состояние процесса измерения периода колебаний

ulong MagnTime; //общее время при измерении периода колебаний
ulong MagnPeriods; //общее число периодов при измерении периода колебаний

uchar NeedResetFlag; //флаг, установкой которого мы определяем, будет ли в при вызове GetData()
//производиться СБРОС интегральных значений, используемых как при
//измерении интенсивности гамма-датчика, так и периода колебаний магн.датчика

//----- прототипы функций -----
void init_ports(void); //ПРОЦЕДУРА ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ПОРТОВ
void syncroT0(); //синхронизация по срабатыванию прерывания таймера T0 (квант времени=1мс)
void ConvertTemp(void); //запуск процесса преобразования температуры в DS18B20
float ReadTemp(void); //чтение температуры из DS18B20. В случае ошибки возвращает -100.0C
void GetData(void); //процедура съема данных, выполняется при чтении регистров (Reg)
void ProcessPacket(void); // Обработка принятого пакета

//----- определения функций -----

void init_ports(void) //ПРОЦЕДУРА ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ПОРТОВ
{
//СЧЕТЧИКИ CNT1,CNT2 - IN,0
DDR_CNT=0;
PORT_CNT=0;

//выход для сброса внешних счетчиков (CNT_RESET) - OUT,0
SETBIT(DDR_CNT_RESET,P_CNT_RESET);
CLEARBIT(PORT_CNT_RESET,P_CNT_RESET);

//выход для включения счета внешних счетчиков (CNT_EN) - OUT,0
SETBIT(DDR_CNT_EN,P_CNT_EN);
CLEARBIT(PORT_CNT_EN,P_CNT_EN);
```

```

//УПРАВЛЕНИЕ ЦАП - УРОВНИ ДИСКРИМИНАЦИИ
SETBIT(DDR_LEVEL_DATA,P_LEVEL_DATA);
CLEARBIT(PORT_LEVEL_DATA,P_LEVEL_DATA);
SETBIT(DDR_LEVEL_CLK,P_LEVEL_CLK);
CLEARBIT(PORT_LEVEL_CLK,P_LEVEL_CLK);
SETBIT(DDR_LEVEL_LOAD,P_LEVEL_LOAD);
SETBIT(PORT_LEVEL_LOAD,P_LEVEL_LOAD);

//УПРАВЛЕНИЕ ЦАП - ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ ФЭУ
SETBIT(DDR_HV_DATA,P_HV_DATA);
CLEARBIT(PORT_HV_DATA,P_HV_DATA);
SETBIT(DDR_HV_CLK,P_HV_CLK);
CLEARBIT(PORT_HV_CLK,P_HV_CLK);
SETBIT(DDR_HV_LOAD,P_HV_LOAD);
SETBIT(PORT_HV_LOAD,P_HV_LOAD);
SETBIT(PORT_HV_SHDN,P_HV_SHDN); //!!!SHDN=1,OUT
SETBIT(DDR_HV_SHDN,P_HV_SHDN);

//ТЕСТОВЫЙ ВЫХОД TEST:
//выход TEST - OUT,1
SETBIT(DDR_TEST,P_TEST);
SETBIT(PORT_TEST,P_TEST);
//выход делителя напряжения на 4 - Z
CLEARBIT(DDR_TEST_DIV4,P_TEST_DIV4);
CLEARBIT(PORT_TEST_DIV4,P_TEST_DIV4);
//выход делителя напряжения на 20 - Z
CLEARBIT(DDR_TEST_DIV20,P_TEST_DIV20);
CLEARBIT(PORT_TEST_DIV20,P_TEST_DIV20);

//ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ DS18B20 - IN,1
CLEARBIT(DDR_TEMP,P_TEMP);
SETBIT(PORT_TEMP,P_TEMP);

//управление передача/прием (1/0) для RS-485 - OUT,0 (RX)
SETBIT(DDR_RS485TXRX,P_RS485TXRX);
CLEARBIT(PORT_RS485TXRX,P_RS485TXRX);

//ДВУХЦВЕТНЫЙ СВЕТОДИОД - OUT,0 (OFF)
SETBIT(DDR_LEDG,P_LEDG);
SETBIT(DDR_LEDR,P_LEDR);
CLEARBIT(PORT_LEDG,P_LEDG);
CLEARBIT(PORT_LEDR,P_LEDR);

//ВХОД для частотного сигнала магнитного датчика - IN,0
CLEARBIT(DDR_MAGN,P_MAGN);
CLEARBIT(PORT_MAGN,P_MAGN);
}

//Обработчик прерывания таймера T0. Выполняется с периодом 1мс.
// Назначение: отсчет РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ (Reg.RealTime) и
// управление процессом СЧЕТА ИМПУЛЬСОВ гамма-датчика (измерение интенсивности):
// 1)останов счета импульсов (синхронно с прерыванием), 2)обработка результата и 3)запуск счета (ровно через 1мс)
#pragma interrupt_handler T0_COMP_interrupt: iv_TIMER0_COMP
void T0_COMP_interrupt(void)
{
    static last_TCNT1; //хранилка последнего значения TCNT1 для режима "дозиметра"

    static ulong MTime; //счетчик для подсчета текущего времени измерения (между опросами)
                        //28.12.2011 - увеличил разрядность с 2 до 4байт.

    Reg.RealTime++; //счетчик реального времени T=1mS, используется для отчета задержек в ModBus.h
    FormTestSignal(); //Формирование серии ТЕСТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ
    // INVERTBIT(PORT_LEDG,P_LEDG);

    switch(CntState){ //в зависимости от СОСТОЯНИЯ СЧЕТА

    case CS_WAITSTOP: //состояние "ОЖИДАНИЕ ОСТАНОВА СЧЕТА"
        CLEARBIT(PORT_CNT_EN,P_CNT_EN); //останавливаем счет!
        Reg.MeasureTime=++MTime; //время измерения

```

```

{
    ulong N1,N2; uchar p;
    //формируем число импульсов в N1:
    N1= T1_OVF_cnt; //количество переполнений внутреннего счетчика-таймера T1 (исп.12 бит)
    if(TESTBIT(TIFR,TOV1)) {
        N1++; //учет возможно еще необработанного переполнения в T1_OVF()
        SETBIT(TIFR,TOV1);} //обнуляем флаг переполнения, чтобы OVF не возникло
    N1<=<=16; N1|=TCNT1; N1<=<=4; //добавляем значение внутреннего счетчика (16 бит)
    p=PIN_CNT; //читаем состояние линий внешних счетчиков CNT1,CNT2
    N1|=p&0x0F; //добавляем значение внешнего счетчика CNT1 (нижний полубайт)
    //аналогично - для N2:
    N2= T2_OVF_cnt;
    if(TESTBIT(TIFR,TOV2)) {
        N2++;
        SETBIT(TIFR,TOV2);
    }
    N2<=<=8; N2|=TCNT2; N2<=<=4; //TCNT2 - 8 бит
    N2|=p>>4; //CNT2, верхний полубайт
    //из временных переменных - в регистры:
    Reg.N1=N1; //насчетанное число импульсов1
    Reg.N2=N2; //насчетанное число импульсов2
}
if(NeedResetFlag){ //если нужен сброс -
    SETBIT(PORT_CNT_RESET,P_CNT_RESET); //сброс внешних счетчиков
    delay_us(2); //2uS для установки линий CNT_D0..7 в 0
    CLEARBIT(PORT_CNT_RESET,P_CNT_RESET); //снимаем сброс
    T1_OVF_cnt=T2_OVF_cnt=TCNT1=TCNT2=0; //обнуляем внутренние счетчики
    MTime=0; //и время измерения
    //NeedResetFlag=0; //и флаг
}
CntState=CS_WAITSTART; //переходим в состояние "ОЖИДАНИЕ СТАРТА СЧЕТА"
break;

case CS_WAITSTART: //состояние "ОЖИДАНИЕ СТАРТА СЧЕТА"
    SETBIT(PORT_CNT_EN,P_CNT_EN); //запускаем счет!
    CntState=CS_RUNNING; //переход в состояние "ИДЕТ СЧЕТ"
    break;

case CS_RUNNING: //состояние "ИДЕТ СЧЕТ"
    MTime++; //время измерения++
    break; //из него мы выйдем только принудительно, в GetData()
}

CLEARBIT(PORT_LEDG,P_LEDG); //режим "дозиметра"
if(TCNT1!=last_TCNT1) {SETBIT(PORT_LEDG,P_LEDG); last_TCNT1=TCNT1;}
}

//Обработчик прерывания переполнения 16-битного счетчика T1.
// Назначение T1: подсчет числа импульсов с амплитудой выше НИЖНЕГО уровня дискриминации.
#pragma interrupt_handler T1_OVF_interrupt: iv_TIMER1_OVF
void T1_OVF_interrupt(void) {T1_OVF_cnt++;}

//Обработчик прерывания переполнения 8-битного счетчика T2.
// Назначение T2: подсчет числа импульсов с амплитудой выше ВЕРХНЕГО уровня дискриминации.
#pragma interrupt_handler T2_OVF_interrupt: iv_TIMER2_OVF
void T2_OVF_interrupt(void) {T2_OVF_cnt++;}

//Обработчик прерывания по съему значения(capture) таймера T3
// Назначение: аппаратная фиксация точного времени прихода спадающего фронта
// частотного сигнала, поступающего от магн.датчика, с целью определить точно общее время и количество
// серии таких периодов, пришедших в пределах некоторого отведенного для этого времени измерения.
// Таким образом можно с высокой точностью определить как период следования, так и частоту импульсов.
// -----
// Общая информация относительно измерения периода колебаний (float Reg.MagnT) частотного сигнала

```

```

// автогенераторного магнитометрического преобразователя, построенного по принципу ДЖМ-3.
// Период колебаний измеряемого сигнала измеряется числом периодов колебаний 16-битного таймера T3,
// укладывающихся в один период сигнала.
// Результирующее значение периода усредняется за число MagnPeriods полных колебаний, пришедших за время
измерения.
// Тактовая частота таймера выбирается как можно выше, из расчета, что за время измерения должно произойти
// не меньше 1,000,000 тактов таймера, для того, чтобы получить низкую дискретность и точность измерения.
// Однако есть 2 ограничения:
// 1. Переменная unsigned long MagnTime (max 4,294,967,295), в которой накапливается общее время
// (число тактов таймера), НЕ должна переполниться, если время измерения может быть слишком
// большое (например, несколько минут). Например, при частоте таймера СК/1=16MHz переполнение
// MagnTime произойдет за 4,294,967,295/16,000,000= 268с= 4.4мин.
// 2. За время одного колебания измеряемого сигнала НЕ допускается возможность переполнения 16-битного значения
// числа тактов таймера. Т.е. если сигнал низкой частоты, то и частота тактов таймера должна соответственно снижаться.
// Например, при частоте таймера СК/1=16MHz переполнение 16-битного значения (65536) будет происходить с
частотой
// 16,000,000/65536= 244Hz, это и есть минимально возможная частота исходного сигнала при таком выборе.
//-----
// Для наших условий (мин время измерения 0.5с, макс - 300с, частота исходного сигнала от 500Hz до 10000Hz)
// выбрана частота тактирования таймера СК/8 = 16МГц/8 = 2МГц.
// Счетчик колебаний MagnPeriods должен быть размера не менее 10000Hz*300с=3,000,000, т.е. 32-битным.

#pragma interrupt_handler T3_InputCapture_interrupt: iv_TIMER3_CAPT
void T3_InputCapture_interrupt(void)
{
    static uint lastICR;

    switch(MagnState){
        //Итак, пришел фронт сигнала. В зависимости от состояния процесса измерения:
        case MS_WAITSTART:
            //Из основной программы нам поступила команда начать измерение -
            //значит обрабатываем пришедший фронт сигнала как самый первый:
            MagnTime+=ICR3;
            lastICR=ICR3;
            MagnPeriods++;
            MagnState=MS_RUNNING;
            break;

        case MS_RUNNING:
            //если пришел очередной фронт измеряемого сигнала -
            if (ICR3<lastICR) MagnTime+=0x10000; //учитываем возможное переполнение таймера
            lastICR=ICR3;
            MagnPeriods++;
            break;

        case MS_WAITSTOP:
            //если из основной программы нам поступила команда завершить измерение -
            //значит этот пришедший фронт сигнала будет является последним:
            if (ICR3<lastICR) MagnTime+=0x10000; //учитываем возможное переполнение таймера
            MagnTime+=ICR3;
            //получаем результат: время MagnTime = ICR3last-ICR3first + NumOVFs*0x10000
            //и в MagnPeriods - число периодов (на 1 меньше, чем число фронтов).
            MagnState=MS_STOPPED;
            break;

        // case MS_STOPPED:
        //     //в этом состоянии ничего не делаем. Ожидаем, что нас переведут в
        MS_WAITSTART
    }
}

//Вспомогательная процедура для температурки, выполняет синхронизацию с прерыванием таймера T0 (период 1мс)
void syncroT0() {
    uchar tmptime=(uchar)Reg.RealTime;
    while(tmptime==(uchar)Reg.RealTime);
}

void ConvertTemp(void) //запуск процесса преобразования температуры в DS18B20
{
    syncroT0(); ow_reset();
    syncroT0(); ow_byte_wr(OW_SKIP_ROM);
    syncroT0(); ow_byte_wr(DS18X20_CONVERT_T);
}

```



```

}

float ReadTemp(void)          //чтение температуры из DS18B20. В случае ошибки возвращает -100.0C
{
    uchar i, err; uchar sp[DS18X20_SP_SIZE];
    //читаем ранее измеренное значение:
    syncroT0(); err=ow_reset();                //reset 1-wire
    syncroT0(); err|=ow_byte_wr(OW_SKIP_ROM);   //to all 1-wire devices
    syncroT0(); err|=ow_byte_wr(DS18X20_READ);   //команда: считать данные измерения
    for (i=0; i<DS18X20_SP_SIZE; i++) {         //и считываем 9 байт
        syncroT0(); sp[i]=ow_byte_rd();
    }
    err|=crc8(sp, DS18X20_SP_SIZE);              //проверяем КС
    if(!err) return *(int*)sp/16.0;              //сохраняем результат, если без ошибок
    else return -100.0;                          //если ошибка
}

void GetData(void) //процедура съема данных, выполняется при чтении регистров (Reg)
{
    // SETBIT(PORT_LEDG,P_LEDG);

    //МАГНИТНЫЙ ДАТЧИК: ОСТАНОВ ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТА:
    if(MagnState!=MS_RUNNING) goto _MagnError; //проверяем, а стартовал ли перед этим процесс измерения (был ли
    первый фронт)?
    MagnState=MS_WAITSTOP;                      //переходим в состояние "ОЖИДАНИЕ ОСТАНОВА" измерения периода
    колебаний автогенератора магн.датчика
    //т.о. подаем знак обработчику InputCapture_interrupt(), что нужно будет
    //остановить процесс измерения на ближайшем фронте измеряемого сигнала
    delay_ms(2);                                //ждем определенное время...
    CLEARBIT(ETIMSK,TICIE3);                    //2мс достаточно для регистрации хотя бы 1 спадающего фронта при частоте 500Гц
    // TCCR3B=0;                                //а после этого - запрещаем прерывание,
    //возникнут)                               //и останавливаем таймер. (можно и не останавливать, все равно прерывания не
    if(MagnState!=MS_STOPPED) goto _MagnError; //проверяем, пришел ли фронт (прерывание сработало, измерение
    произошло)?
    Reg.MagnT=MagnTime/2./MagnPeriods; //если все в порядке - рассчитываем средний период колебаний (в мкс)
    // Reg.MagnT=1000000/Reg.MagnT;            //частота в Гц
    goto _next;

    _MagnError;; //ОШИБКА магн.датчика: отсутствует сигнал автогенератора, либо его частота ниже допустимой
    (500Гц)
    Reg.MagnT=-1.0;                             //выставляем отрицательное значение периода колебаний в случае ошибки.
    MagnTime=MagnPeriods=0;

    _next;;
    if(NeedResetFlag){                          //если после измерения нужно сбросить результат -
        MagnTime=0;                            //выполняем сброс общего времени
        MagnPeriods=0;                          //и сброс числа периодов колебаний.
    }

    //ТЕМПЕРАТУРА:
    //NB: прерывать общение по 1-wire интерфейсу надолго нельзя, не более нескольких микросекунд,
    //поэтому прерывание T3_InputCapture_interrupt() запрещено заранее.
    Reg.Temp=ReadTemp(); //читаем ранее преобразованное значение температуры из DS18B20
    ConvertTemp(); //и даем ему команду сделать еще одно измерение (на будущее)
    //итого мы уже задержались примерно на 17мс..

    //ГАММА-ДАТЧИК: ОСТАНОВ! ИЗМЕРЕНИЯ, ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТА, СТАРТ! ИЗМЕРЕНИЯ:
    CntState=CS_WAITSTOP;                      //выполняем переход в сост. "ОЖИДАНИЕ ОСТАНОВА" измерения интенсивности
    while(CntState==CS_WAITSTOP); //ожидаем (до 1 мс) срабатывания таймера T0 и съема данных
    Reg.N1,.N2,.MeasureTime
    //Дождались. Теперь по полученным в регистрах данных неспеша выполняем все-все расчеты:
    //здесь маленькое исправление: если верхний уровень дискр. в самом веру (==255),
    //то это означает, что он не используется, его отключили, а учитываем только нижний уровень,
    //т.е. при подсчете интенсивности НЕ ограничиваем амплитуду импульсов сверху. См. ниже:
    if(Reg.SetupReg.CompLevel2==255) Reg.N2=0;
    Reg.Intens=((float)Reg.N1)-Reg.N2/Reg.MeasureTime*1000; //исходное значение интенсивности, имп./с.
    //если темп.коррекция включена и показания температуры правдоподобные -

```

```

if(Reg.SetupReg.TempCE && Reg.Temp>-50){ //темп. коррекция интенсивности
    float dt=Reg.Temp-NORMTEMP;
    Reg.Intens/=(1+
        Reg.SetupReg.TempC1*dt+
        Reg.SetupReg.TempC2*dt*dt+
        Reg.SetupReg.TempC3*dt*dt*dt);
}
if(Reg.SetupReg.TempCME && Reg.Temp>-50){ //темп. коррекция периода колебаний
    float dt=Reg.Temp-NORMTEMP;
    Reg.MagnT/=(1+
        Reg.SetupReg.TempCM1*dt+
        Reg.SetupReg.TempCM2*dt*dt+
        Reg.SetupReg.TempCM3*dt*dt*dt);
}
Reg.MeasureID++; //идентификатор данных измерения - пока просто инкрементируем

while(CntState!=CS_RUNNING); //ждем пока измерение интенсивности полностью стартует..
//и только после этого разрешим прерывания от магнитного датчика:

//МАГНИТНЫЙ ДАТЧИК: СТАРТ ИЗМЕРЕНИЯ:
MagnState=MS_WAITSTART; //устанавливаем состояние "ОЖИДАНИЕ СТАРТА" измерения
//т.о. подаем знак обработчику InputCapture_interrupt(), что нужно будет
//начать(продолжить) процесс измерения на ближайшем спадающем фронте
измеряемого сигнала
TCCR3B= (1<<ICNC3) | (0<<ICES3) | 0x02; //стартуем таймер, f=CK/8=2MHz, съём и прерывание по спадающему
фронту
//ICNC - Input Capture Noise Canceller (4CKs): En/Dis
//ICES - Input Capture Edge Select: 0-falling edge, 1-rising edge
SETBIT(ETIFR,ICF3); //очищаем флаг прерывания (на всякий случай) и
SETBIT(ETIMSK,TICIE3); //разрешаем! прерывание InputCapture_interrupt()... далее вся работа там.

// CLEARBIT(PORT_LEDG,P_LEDG);
} //GetData() - всего данная процедура занимает около 18мс

void ProcessPacket(void) // Обработка принятого пакета
{
    if(((CommBuf[0]!=SysReg.device_addr)&&(CommBuf[0]!=0x00)) || //если обращаются не по нашему адресу и не по
широковещательному
        (CommBufLen<4) || //или пакет слишком короткий
        (CalcCRC16(CommBuf,CommBufLen)!=0)) //или неверная CRC -
    {
        restart_RX(); //обнуляем буфер и переходим к приему следующего пакета
        return; //выход, ничего не отвечаем..
    }
    if((CommBuf[0]==0x00)&&(CommBuf[1]!=0x08))
    { //для широковещательных пакетов поддерживается только 0x08 - функция диагностики
        restart_RX();
        return;
    }
}

//ну а если обратились по нашему адресу и пакет исправный - то будем отвечать в любом случае:
CommBuf[0]=SysReg.device_addr; //перепишем адрес устройства (для случая, если запрос был широковещательным)

//анализируем код функции:
switch (CommBuf[1]) {

case 0x03: { //функция 0x03 - чтение группы регистров
    uint r_startb=((uint)CommBuf[2]<<8|CommBuf[3])*2; //начальный адрес(в байтах)
    uchar r_countb= CommBuf[5] *2; //длина блока (в байтах)
    uchar i;

    //смотрим, какие регистры хотят читать:
    if (r_startb<REGOFFSET*2){ //если системные (общие для всех устройств, адресуются с 0)
        if(r_startb+r_countb > sizeof(TSysReg)){
            //ошибка: неверный адрес данных - генерируем сообщение об ошибке:
            CommBuf[1]=0x80; //устанавливаем старший бит в коде функции
            CommBuf[2]=ERR_ILLEGAL_DATA_ADDRESS; //код ошибки: неверный адрес данных
            CommBufLen=3+2; //длина пакета
        } else{

```

```

//если все в порядке - отвечаем: ADDR, 0x03, BB, data[], CRCL,CRCH
CommBuf[2]=r_countb; //длина блока (в байтах)
for(i=0;i<r_countb;i++) //заполнение блока данных из регистров (Reg)
    CommBuf[3+i]=((uchar *)&SysReg)[r_startb+i];
CommBufLen=3+r_countb+2; //длина пакета
} //if
} else { //если обычные, наши (адресуются с REGOFFSET (в словах))
    r_startb-=REGOFFSET*2; //вычитаем из адреса смещение (в байтах)
    if(r_startb+r_countb > sizeof(TReg)){
        //ошибка: неверный адрес данных - генерируем сообщение об ошибке:
        CommBuf[1]=0x80; //устанавливаем старший бит в коде функции
        CommBuf[2]=ERR_ILLEGAL_DATA_ADDRESS; //код ошибки: неверный адрес данных
        CommBufLen=3+2; //длина пакета
    } else {
        //если все в порядке - отвечаем: ADDR, 0x03, BB, data[], CRCL,CRCH
        if(r_startb+r_countb > sizeof(TSetupReg)){ //если при этом читаются рабочие регистры -
            NeedResetFlag= Reg.SetupReg.ResetOnRead; //нужен ли сброс интегральных значений при съеме данных
            GetData(); //процедура съема данных, занимает 16мс(!!!)
        }
        CommBuf[2]=r_countb; //длина блока (в байтах)
        for(i=0;i<r_countb;i++) //заполнение блока данных из регистров (Reg)
            CommBuf[3+i]=((uchar *)&Reg)[r_startb+i];
        CommBufLen=3+r_countb+2; //длина пакета
    } //if
} }
break;

case 0x06: //функция 0x06 - установка одного регистра: ADDR,0x06, AH,AL, dataL,dataH, CRCL,CRCH
case 0x10: //и функция 0x10 - установка группы регистров: ADDR,0x10, AH,AL, WH,WL, BB, data[], CRCL,CRCH
{
    uint r_startb=((uint)CommBuf[2]<<8|CommBuf[3])*2; //начальный адрес(в байтах)
    uchar r_countb; //длина блока (в байтах)
    uchar i;
    if(CommBuf[1]==0x06) r_countb=2; //длина блока данных = 2 байта
    else r_countb=CommBuf[6]; //длина блока данных = BB

    //смотрим, какие регистры хотят устанавливать:
    if(r_startb<REGOFFSET*2){ //если системные (общие для всех устройств, адресуются с 0)
        if(r_startb+r_countb > sizeof(TSysReg)){ //проверка на диапазон
            //ошибка: неверный адрес данных - генерируем сообщение об ошибке:
            CommBuf[1]=0x80;
            CommBuf[2]=ERR_ILLEGAL_DATA_ADDRESS; //код ошибки: неверный адрес данных
            CommBufLen=3+2;
        } else {
            //если все в порядке:
            if(CommBuf[1]==0x06){ //для функции 0x06:
                for(i=0;i<r_countb;i++) ((uchar *)&SysReg)[r_startb+i] = CommBuf[4+i]; //заполнение регистров SysReg из
                блока данных
                // CommBufLen=; //отвечаем тем же: ADDR,0x06, AH,AL, dataL,dataH, CRCL,CRCH
            } else { //для функции 0x10:
                for(i=0;i<r_countb;i++) ((uchar *)&SysReg)[r_startb+i] = CommBuf[7+i]; //заполнение регистров SysReg из
                блока данных
                CommBufLen=6+2; //отвечаем: ADDR,0x10, AH,AL, WH,WL, CRC,CRC
            }
            save_SysReg(); //сохраняем в EEPROM значения сисрегистров
        } //if
    } else { //если регистры устройства (наши) (адресуются с REGOFFSET в словах)
        r_startb-=REGOFFSET*2; //вычитаем из адреса смещение (в байтах)
        if(r_startb+r_countb > sizeof(TReg)){ //проверка на диапазон
            //ошибка: неверный адрес данных - генерируем сообщение об ошибке:
            CommBuf[1]=0x80;
            CommBuf[2]=ERR_ILLEGAL_DATA_ADDRESS; //код ошибки: неверный адрес данных
            CommBufLen=3+2;
        } else {
            //если все в порядке:
            if(CommBuf[1]==0x06){ //для функции 0x06:

```

```

        for(i=0;i<r_countb;i++) ((uchar *)&Reg)[r_startb+i] = CommBuf[4+i];    //заполнение регистров Reg из блока
данных
//      CommBufLen=;                                //отвечаем тем же: ADDR,0x06, AH,AL, dataL,dataH, CRCL,CRCH
    }else{                                           //для функции 0x10:
        for(i=0;i<r_countb;i++) ((uchar *)&Reg)[r_startb+i] = CommBuf[7+i]; //заполнение регистров Reg из блока данных
        CommBufLen=6+2;                             //отвечаем: ADDR,0x10, AH,AL, WH,WL, CRC,CRC
    }//if
    //обработка изменения регистров - уровней дискриминации CompLevel1,CompLevel2:
    if(r_startb < (uchar*)&(Reg.SetupReg.HighVoltage)-(uchar*)&(Reg) &&    //сравниваем со смещением
следующего регистра
        r_startb+r_countb > (uchar*)&(Reg.SetupReg.CompLevel1)-(uchar*)&(Reg))//сравниваем со смещением этого
регистра
    {
        //если область записанной памяти [r_startb...r_startb+r_countb) пересекается с областью
рассм.регистров -
        SetLevelDAC(Reg.SetupReg.CompLevel1, Reg.SetupReg.CompLevel2);    //- то уст. уровни дискриминации!
    }
    //обработка изменения регистров - напряжение питания ФЭУ HighVoltage:
    if(r_startb < (uchar*)&(Reg.SetupReg.TempCE)-(uchar*)&(Reg) &&    //сравниваем со смещением
следующего регистра
        r_startb+r_countb > (uchar*)&(Reg.SetupReg.HighVoltage)-(uchar*)&(Reg))//сравниваем со смещением этого
регистра
    {
        //если область записанной памяти [r_startb...r_startb+r_countb) пересекается с областью
рассм.регистров -
        SetHVDAC(Reg.SetupReg.HighVoltage, Reg.SetupReg.HV_SHDN);    //устанавливаем уровень напр.ФЭУ
    }
    //обработка регистра-команды:
    if(TESTBIT(Reg.Command,C_RESET)){ //обработка команды "СБРОС СЧЕТА"
/*ConvertTemp(); //в момент сброса надо запустить новое преобразование темп.в DS18B20..
        NeedResetFlag=1;    //устанавливаем флаг: нужен сброс!
        CntState=CS_WAITSTOP; //выполняем переход(!) в сост. "ОЖИДАНИЕ ОСТАНОВА"
        // (далее будет сброс, затем снова старт счета, но мы этого не ожидаемся..)
        */
        NeedResetFlag=1;    //нужен ли сброс: НУЖЕН
        GetData();    //процедура съема данных, где происходит и СБРОС также
    }
    if(TESTBIT(Reg.Command,C_SAVESETUPREG)){ //"запись установочных регистров в EEPROM"
        SETBIT(PORT_LEDR,P_LEDR);    //красный - на время записи
        save_SetupReg();
        CLEARBIT(PORT_LEDR,P_LEDR);
    }
    Reg.Command=0;    //обработали - и сбросили биты
} //if
} //if
}
break;

case 0x08:    //функция 0x08 - Диагностика
if(CommBuf[2]!=0x00) { //подфункция, ст.байт должен быть==0
    CommBuf[1]=0x80;
    CommBuf[2]=ERR_ILLEGAL_FUNCTION;    //код ошибки: неверная функция
    CommBufLen=3+2;
    break;
}
switch (CommBuf[3]) { //подфункция, мл.байт:
case 00: {    //подфункция 00 - чтение всех системных регистров
    uchar i, r_countb=sizeof(TSysReg); //длина блока (в байтах)
    CommBuf[4]=r_countb;
    for(i=0;i<r_countb;i++)    //заполнение блока данных из регистров (SysReg)
        CommBuf[5+i]= ((uchar *)&SysReg)[i];
    CommBufLen=5+r_countb+2;    //длина пакета
    }
    break;
case 02:    //подфункция 02 - возврат данных запроса
    break;    //просто передаем принятый пакет (все как есть).
case 01:    //подфункция 01 - рестарт связи (возврат к нормальному режиму работы)
    SysReg.flag_silence_mode=0;    //прекращаем режим "только слушать"
    save_SysReg();    //сохраняем в EEPROM значения сисрегистров
    restart_RX();    //ответ не возвращаем
    return;
case 04:    //подфункция 04 - установить режим "только слушать"

```

```

SysReg.flag_silence_mode=1;          //устанавливаем режим "только слушать"
save_SysReg();                      //сохраняем в EEPROM значения сисрегистров
restart_RX();                        //ответ не возвращаем
return;
break;
default:                             //если указан неизвестный код подфункции -
CommBuf[1]=0x80;
CommBuf[2]=ERR_ILLEGAL_FUNCTION;    //код ошибки: неверная функция
CommBufLen=3+2;
break;
} //switch (CommBuf[3]) - подфункция
break; //функция 0x08

default:                             //если указан неизвестный код функции -
CommBuf[1]=0x80;
CommBuf[2]=ERR_ILLEGAL_FUNCTION;    //код ошибки: неверная функция
CommBufLen=3+2;
break;
} //switch

//пакет подготовлен. приступаем к передаче:
if(SysReg.flag_silence_mode) { //если установлен режим "только слушать" - ответ не возвращаем
restart_RX();
return;
}
*(uint *)&CommBuf[CommBufLen-2]= CalcCRC16(CommBuf,CommBufLen-2); //расчет CRC
start_TX();                      //начать передачу CommBuf[CommBufLen]
} //ProcessPacket();

//----- MAIN -----
void main(void)
{
init_ports();                    //инициализация портов
SETBIT(PORT_LEDG,P_LEDG);

//запуск таймера T0 на прерывание с периодом 1 мс, (он нужен также для
//задержек в SetXXDAC(), а также по нему выполняются ConvertTemp(), ReadTemp()):
TCCR0=0; TCNT0=0; OCR0=249;      //OCR0: задаем период
TIMSK|=(1<<OCIE0);              //вкл.прерывание T0_COMP по TCNT0==OCR0
TCCR0|=(1<<WGM01)|(0<<WGM00)|0x04; //старт! (CK/64)

SetHVDAC(255,1);                 //выключаем ФЭУ (SHDN=1) (еще раз, на всякий случай)
delay_ms(500);                   //задержка 0.5с для установления питания

SETBIT(PORT_LEDR,P_LEDR);        //красный - на время обращения в EEPROM
init_SysSetupReg();              //чтение(запись) сист. и уст. регистров из EEPROM
CLEARBIT(PORT_LEDR,P_LEDR);

SetLevelDAC(Reg.SetupReg.CompLevel1, Reg.SetupReg.CompLevel2); //уст. уровней дискриминации
SetHVDAC(Reg.SetupReg.HighVoltage/2+128, Reg.SetupReg.HV_SHDN); //уст. половины напряжения ФЭУ

delay_ms(500);                   //еще через 0.5с -
SetHVDAC(Reg.SetupReg.HighVoltage, Reg.SetupReg.HV_SHDN); //номинальное напряжение ФЭУ

// ow_set_bus(&PIN_TEMP,&PORT_TEMP,&DDR_TEMP,P_TEMP); //инициализация 1-wire интерфейса DS18B20
ow_reset();
// ConvertTemp(); //сброс и запуск первого преобразования темп.в DS18B20..
//примечание:
// я подумал, и отказался от преобразования температуры ConvertTemp() в момент
// включения устройства. Это значение никому не нужно! Лучше изначально в DS18B20
// будет значение по умолчанию==85.0C. Тогда если перед первым чтением регистров
// (GetData()) пользователь забудет подать команду C_RESET, то считается имеенно 85C,
// что и будет ему сигнализировать об _ошибочно считанной_ температуре!
// А иначе значение хоть и будет правдоподобное, но не привязанное ко времени,
// что недопустимо, т.к. по температуре производится _коррекция_ показаний интенсивности.

SETBIT(PORT_LEDR,P_LEDR);        //красный: готовность к работе
delay_ms(500);                   //задержка 0.5с - красный мигнет 2-й раз..

```

```

//настройка счетчиков-таймеров T1 и T2 на счет внешних импульсов:
TCCR1B=0x06; //старт! external CK on falling edge
TCCR2= 0x06; //старт! external CK on falling edge
TIMSK|=(1<<TOIE1)|(1<<TOIE2); //вкл.прерывания T1_OVF() и T2_OVF()

init_UART0(103); //UART0: 9600
asm("sei"); //поехали!

NeedResetFlag=1; //производим при включении первый сброс датчика
GetData(); //вызываем процедуру съема данных измерения (со сбросом)

CLEARBIT(PORT_LEDR,P_LEDR);

while(1){
    comm_handler(); //процедура-обработчик Modbus
    if(comm_st==ST_RX_COMPLETE) ProcessPacket(); //выполняем обработку вх. пакета
} //while

} //main()

```

Додаток Г

Карта регістрів комбінованого свердловинного пристрою

Таблиця Г.1

Карта регістрів комбінованого свердловинного пристрою

Функція	Адрес регістру	Формат	Внутр. ім'я змін.	Найменування параметру	Діапазон значень
Установчі регістри					
03h, 06h, 10h (читання / запис)	0100h	WORD	Мол. байт: Mode	Режим роботи датчика	0 (<i>M_INTEGRAL</i>) (за замовчуванням) – режим измерения среднеинтегральной интенсивности за время между двумя последов. опросами датчика. Между опросами производится непрерывный счет импульсов <i>N</i> и фиксируется прошедшее время <i>T</i> . При чтении рабочих регистров счет приостанавливается, и если <i>ResetOnRead</i> <> 0, то счетчик обнуляется (предназначено для НАКС-ПК), иначе – счет продолжается без обнуления (для контроля промежуточного результата в ПАП, ПАКС).
			Ст. байт: ResetOnRead	Обнуление счетчика импульсов при чтении данных (установка для <i>Mode==M_INTEGRAL</i>)	0 – выкл., 1 – вкл. (по умолчанию)
	0101h	WORD	MeasureTimeSet	Установка времени измерения (для <i>Mode==M_CYCLED</i>)	1...65535 мс, по умолчанию 1000 мс
	0102h	WORD	Резерв		
	0103h	WORD	Мл. байт: CompLevel1	Установка нижнего уровня дискриминации (компаратор-счетчик 1)	Значение для ЦАП, 0...255
			Ст. байт: резерв		
	0104h	WORD	Мл. байт: CompLevel2	Установка верхнего уровня дискриминации (компаратор-счетчик 2)	Значение для ЦАП, 0...255
			Ст. байт: резерв		
	0105h	WORD	Мл. байт: HighVoltage	Установка напряжения питания ФЭУ	Значение для ЦАП, 0...255
			Ст. байт: HV_SHDN	Флаг выключения напряжения питания ФЭУ	0 – ФЭУ включено, иначе – выключено, по умолчанию 0

Функція	Адрес регістру	Формат	Внутр. ім'я змін.	Найменування параметру	Діапазон значень
	0106h	WORD	Мл. байт: TempCE	Темп.коррекция интенсивности (Intens) гамма-датчика	0 – коррекция не производится, 1- производится. По умолчанию 0
			Ст. байт: резерв		
	0107h	FLOAT	TempC1	Температурный коэффициент 1-й степени (a1/a0)	FLOAT, по умолчанию: 0.0
	0109h	FLOAT	TempC2	Температурный коэффициент 2-й степени (a2/a0)	FLOAT, по умолчанию: 0.0
	010Bh	FLOAT	TempC3	Температурный коэффициент 3-й степени (a3/a0)	FLOAT, по умолчанию: 0.0
	010D	FLOAT	TempC4_r	Резерв	
	010Fh	WORD	Мл. байт: TempCME	Темп.коррекция периода колебаний (MagnT) магн.датчика	0 – коррекция не производится, 1- производится. По умолчанию 0
			Ст. байт: резерв		
	0110h	FLOAT	TempCM1	Температурный коэффициент 1-й степени (a1/a0)	FLOAT, по умолчанию: 0.0
	0112h	FLOAT	TempCM2	Температурный коэффициент 2-й степени (a2/a0)	FLOAT, по умолчанию: 0.0
	0114h	FLOAT	TempCM3	Температурный коэффициент 3-й степени (a3/a0)	FLOAT, по умолчанию: 0.0
	0116h	FLOAT	TempCM4_r	Резерв	
Робочі регістри					
06h, 10h (запись)	R	BOOL	Command	Регистр-команда. Предназначен для подачи команд устройству. Содержимое регистра не сохраняется. Каждой команде присвоен соответствующий бит. Для подачи одной или нескольких команд одновременно следует установить соответствующие биты в 1.	Бит 0 (C_RESET): сброс датчика. Выполняются запуск нового измерения интенсивности (сброс счета) и первое преобразование температуры в температурном датчике. Бит 1 (C_SAVESETUPREG): запись установочных регистров в EEPROM
03h (чтение)	R+01h	DWORD	RealTime	Время работы устройства с момента включения, мс	0...4294967296 мс (до 50 суток)
	R+03h	WORD	MeasureID	Идентификатор (идент.код) данных измерения	Автоинкремент в диапазоне 0...FFFFh).
	R+04h	DWORD	N1	Число импульсов по первому счетчику (с амплитудой выше нижнего уровня дискриминации)	0...4294967296
	R+06h	DWORD	N2	Число импульсов по второму счетчику (с амплитудой выше верхнего уровня дискриминации)	0...4294967296
	R+08h	DWORD	MeasureTime	Время измерения, мс	0...4294967296 мс

Функція	Адрес регістру	Формат	Внутр. ім'я змін.	Найменування параметру	Діапазон значень
	R+0Ah	FLOAT	Temp	Температура, град.С. Примечание: выдается значение температуры, измеренное в момент предыдущего (!) считывания регистров или в момент обработки команды C_RESET (сброс датчика).	FLOAT
	R+0Ch	FLOAT	Intens	Интенсивность, имп./с. Конечное температурно скомпенсированное значение. Рассчитывается исходя из исходного значения интенсивности $IntensRaw = (N2 - N1) / MeasureTime * 1000$ и заданных температурных коэффициентов <i>TempCN</i> по формуле: $Intens = IntensRaw / (1 + TempC1 * (Temp - 20) + TempC2 * (Temp - 20)^2 + TempC3 * (Temp - 20)^3).$	FLOAT
	R+0Eh	FLOAT	MagnT	Период колебаний автогенераторного магнитометрического преобразователя, мкс. Конечное температурно скомпенсированное значение. Измеряется за время измерения <i>MeasureTime</i> .	FLOAT

Додаток Д

Діаграми промислових випробовувань комбінованого свердловинного пристрою

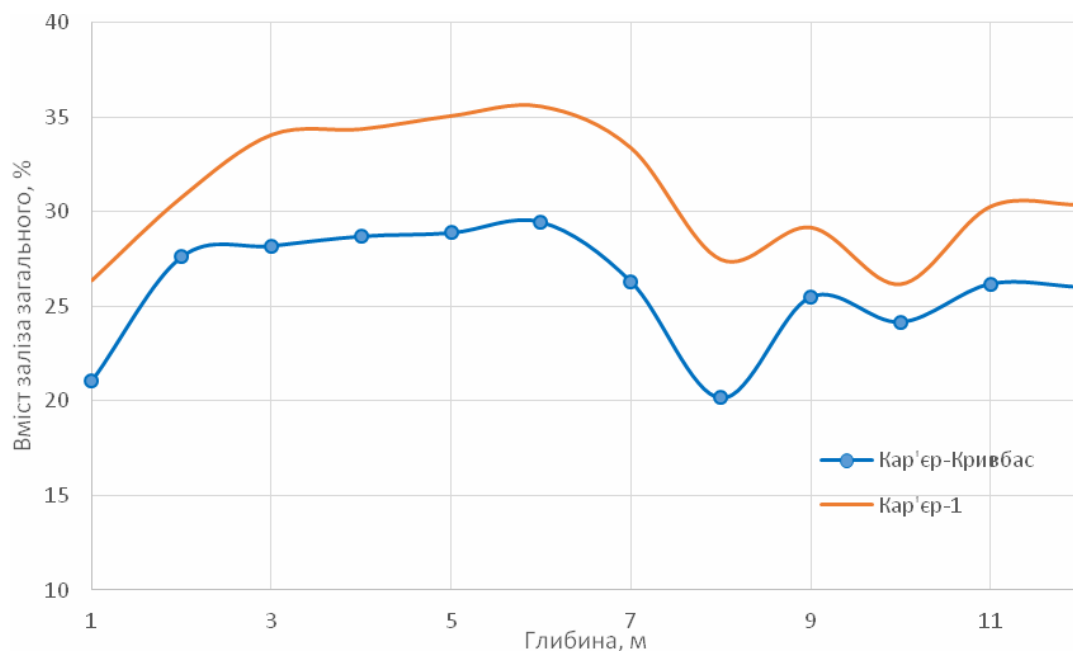


Рис. Д.1 Розподіл заліза загального по глибині свердловини № 1 за даними двох станцій.

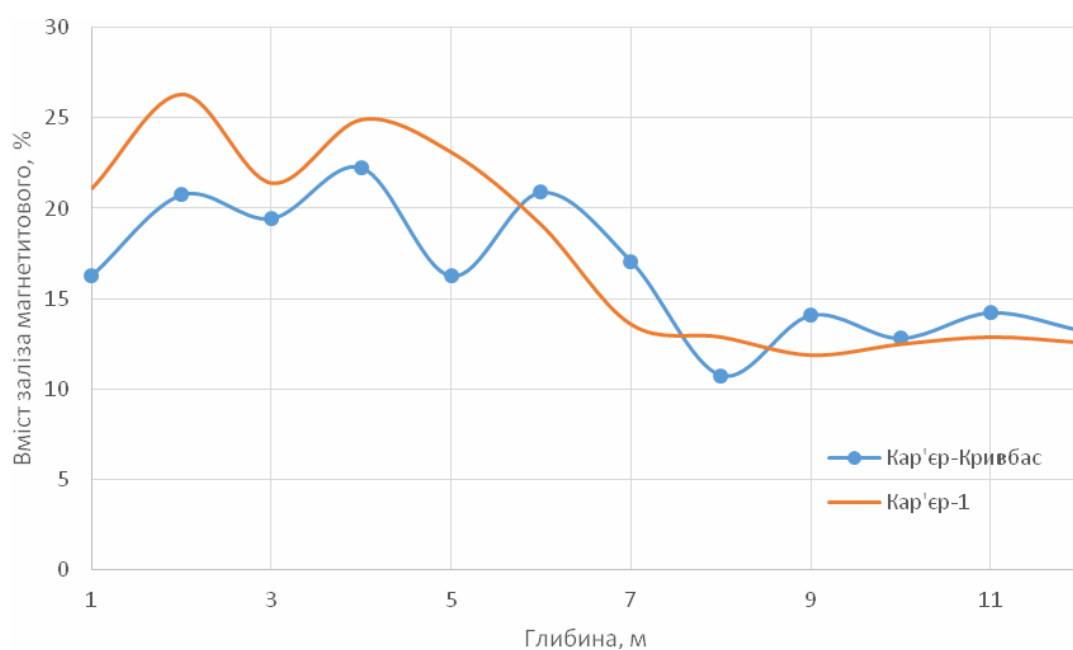


Рис. Д.2 Розподіл заліза магнетитового по глибині свердловини № 1 за даними двох станцій.

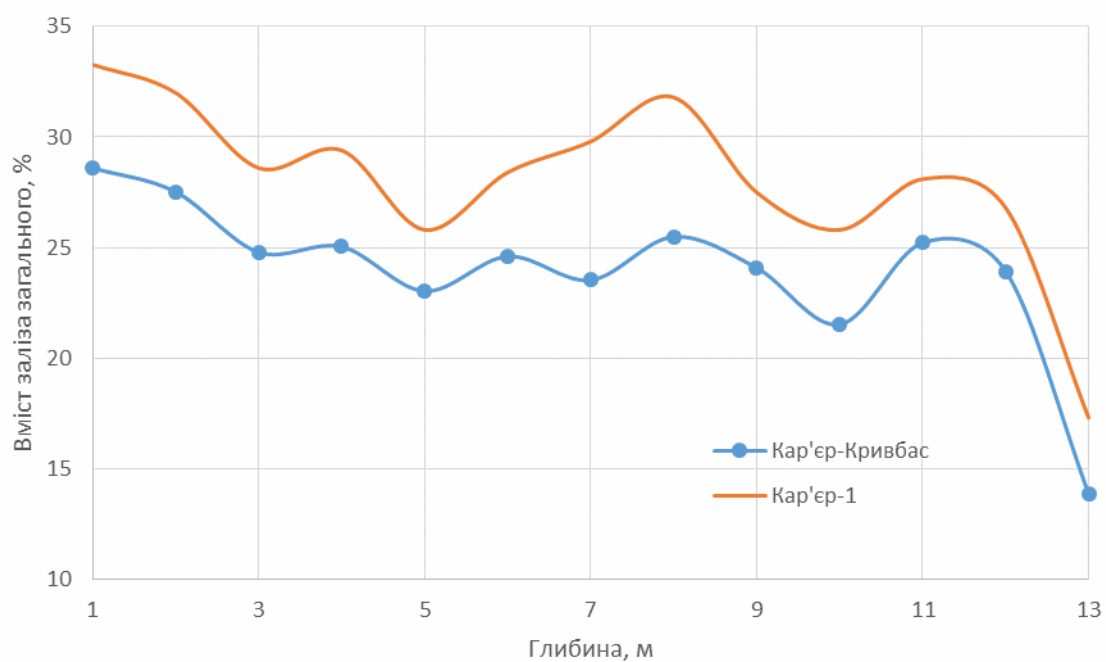


Рис. Д.3 Розподіл заліза загального по глибині свердловини № 2 за даними двох станцій.

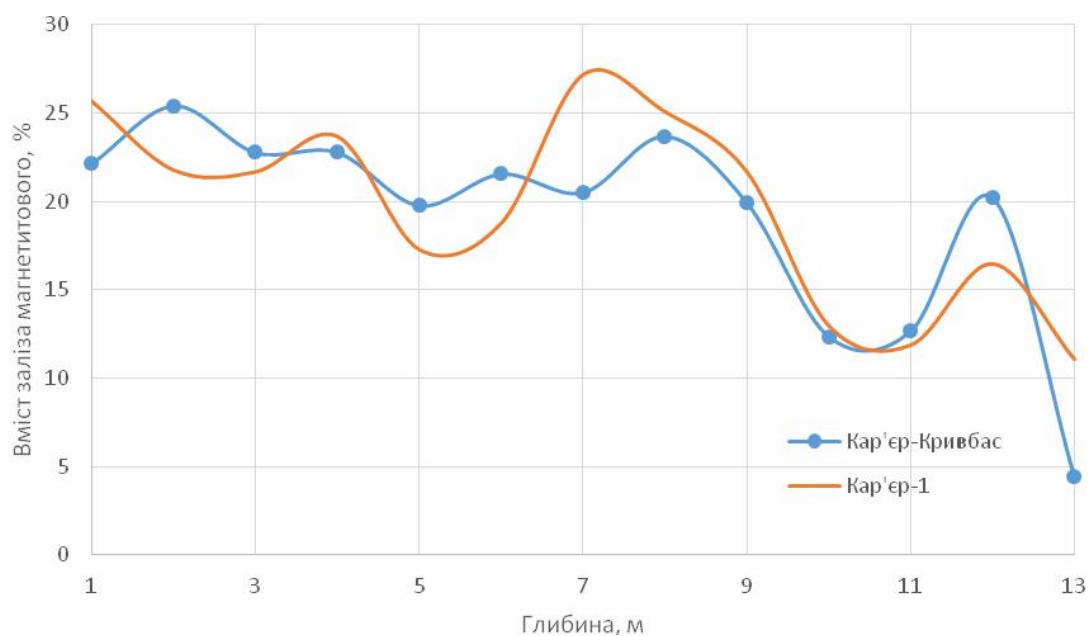


Рис. Д.4 Розподіл заліза магнетитового по глибині свердловини № 2 за даними двох станцій.

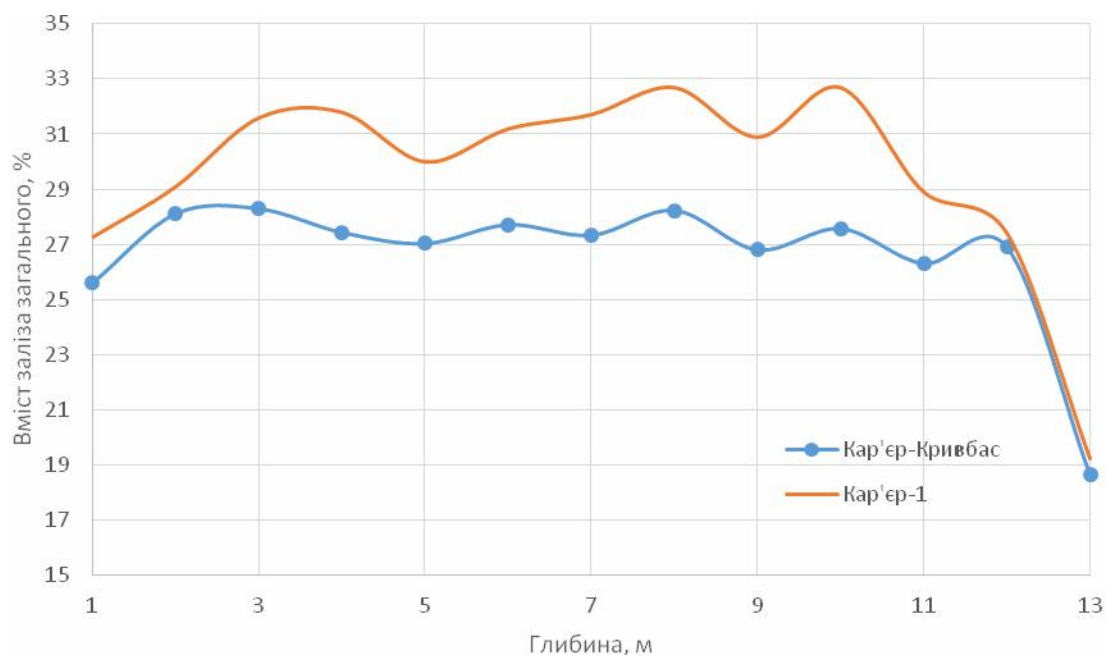


Рис. Д.5 Розподіл заліза загального по глибині свердловини № 3 за даними двох станцій.

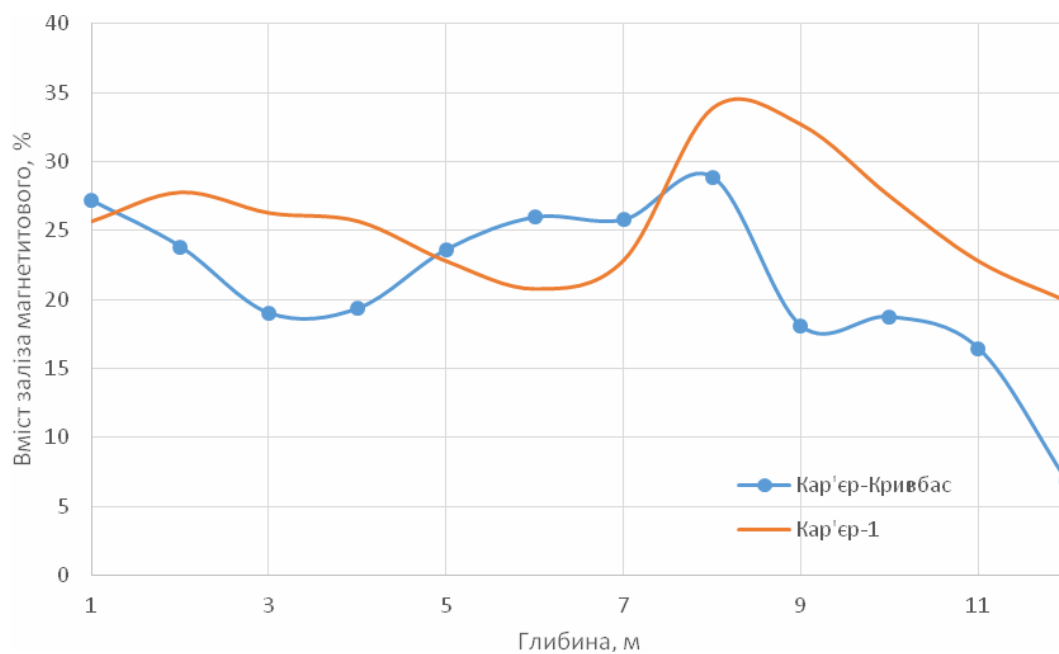


Рис. Д.6 Розподіл заліза магнетитового по глибині свердловини № 3 за даними двох станцій.

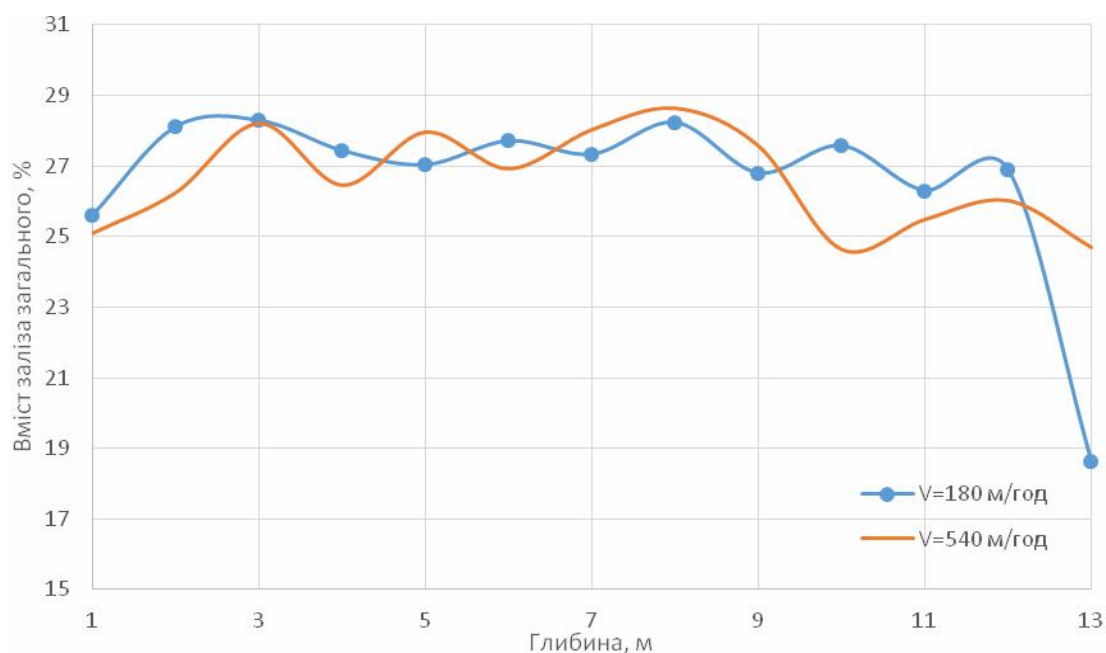


Рис. Д.7 Порівняння даних вимірювання розподілу вмісту заліза загального по глибині свердловини № 3 станцією «Кар'єр-Кривбас» різних швидкостях підйому свердловинного пристрою.

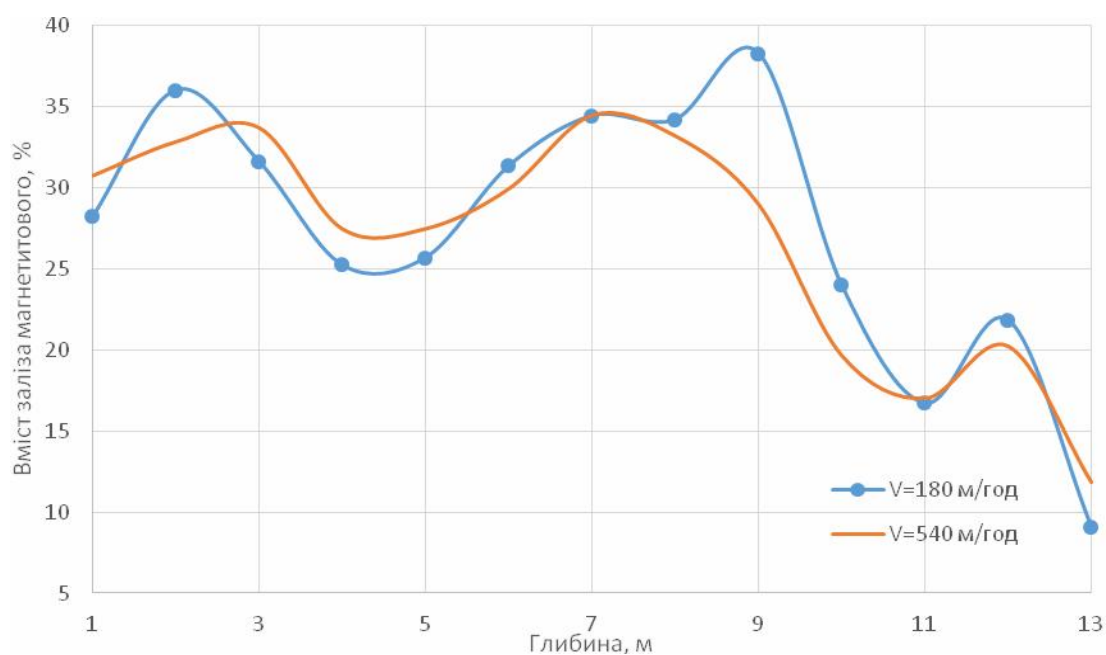


Рис. Д.8 Порівняння даних вимірювання розподілу вмісту заліза магнетитового по глибині свердловини № 3 станцією «Кар'єр-Кривбас» на різних швидкостях підйому свердловинного пристрою.

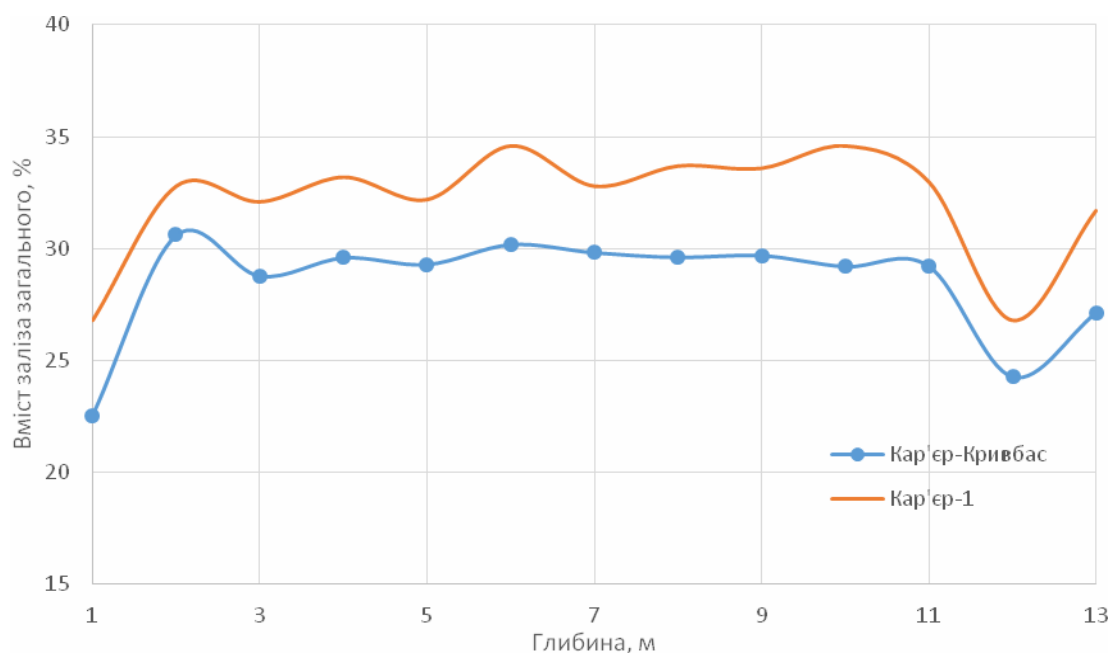


Рис. Д.9 Розподіл заліза загального по глибині свердловини № 4 за даними двох станцій.

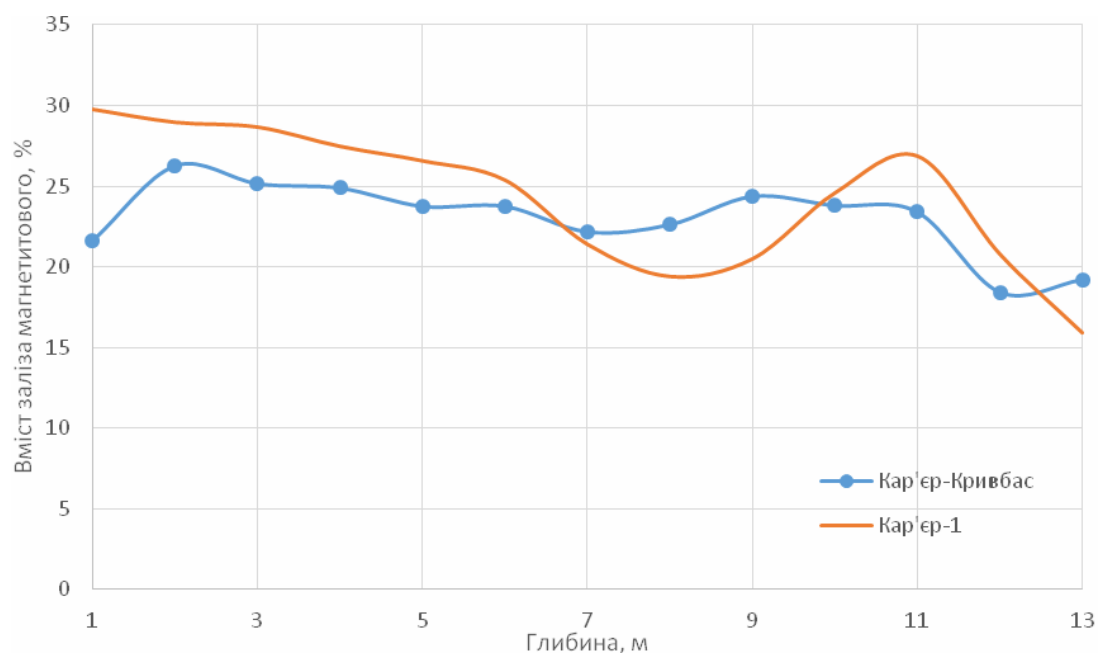


Рис. Д.10 Розподіл заліза магнетитового по глибині свердловини № 4 за даними двох станцій.

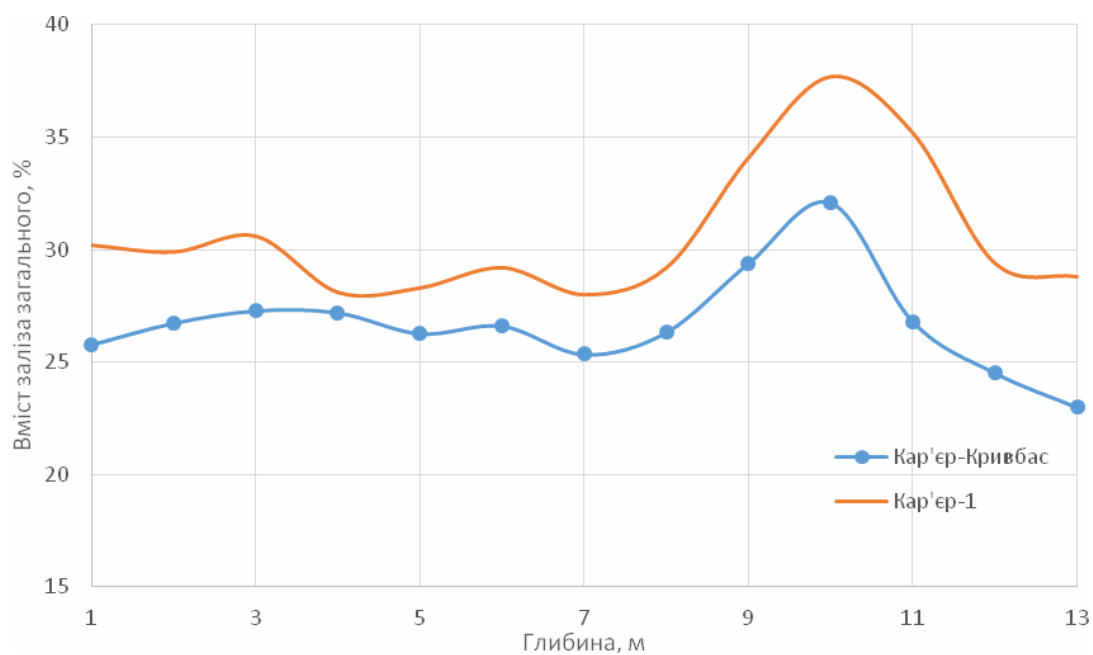


Рис. Д.11 Розподіл заліза загального по глибині свердловини № 5 за даними двох станцій.

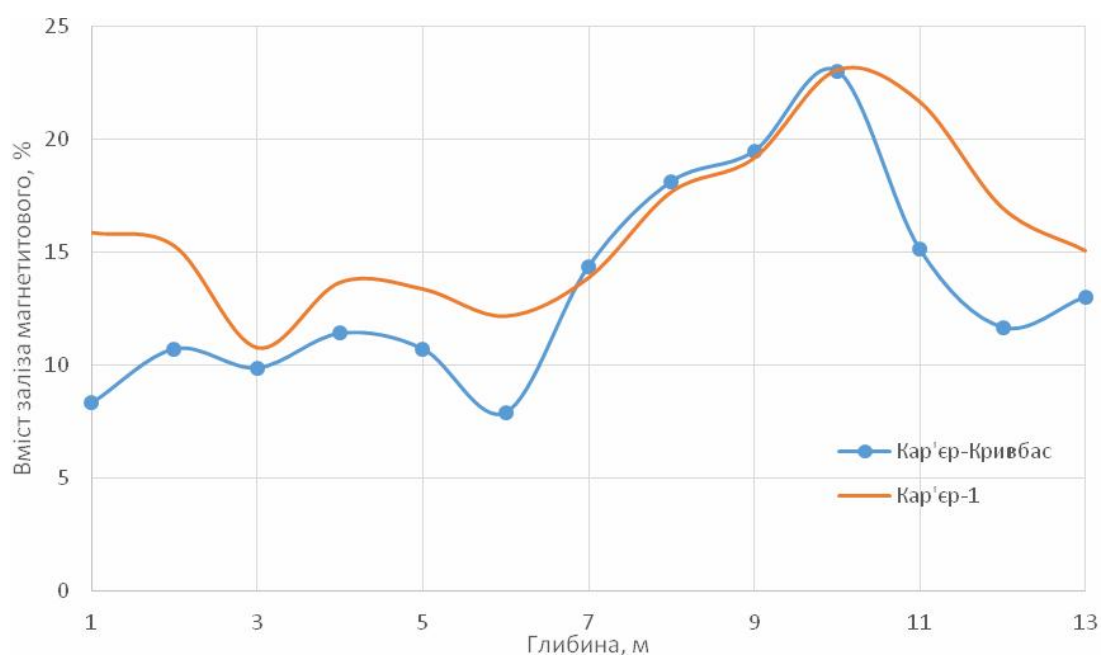


Рис. Д.12 Розподіл заліза магнетитового по глибині свердловини № 5 за даними двох станцій.

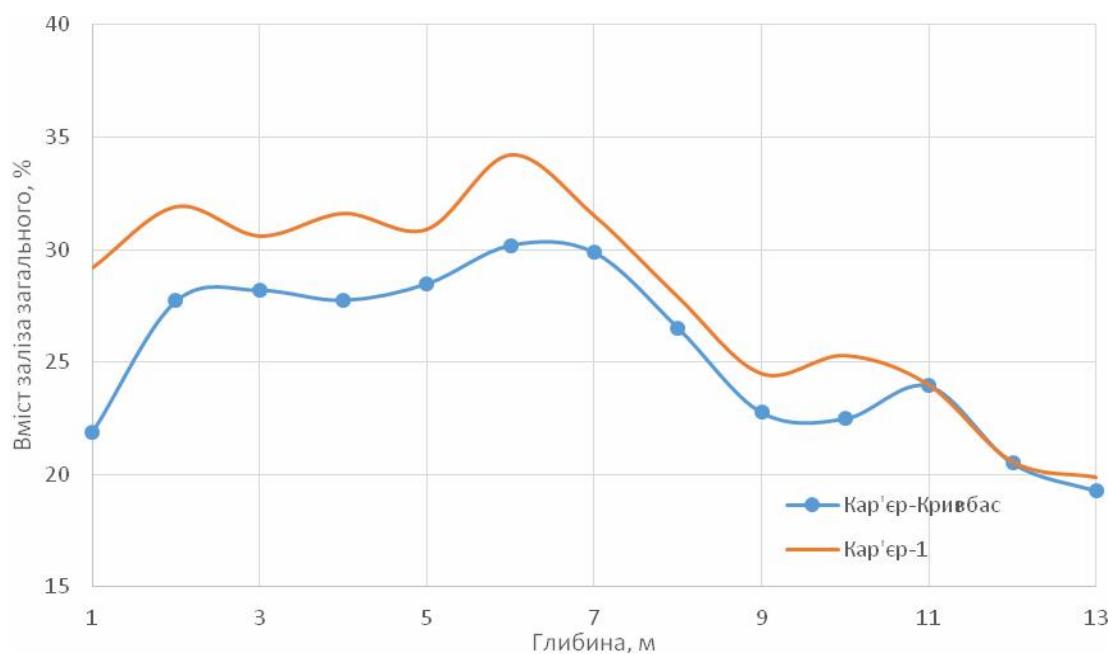


Рис. Д.13 Розподіл заліза загального по глибині свердловини № 6 за даними двох станцій.

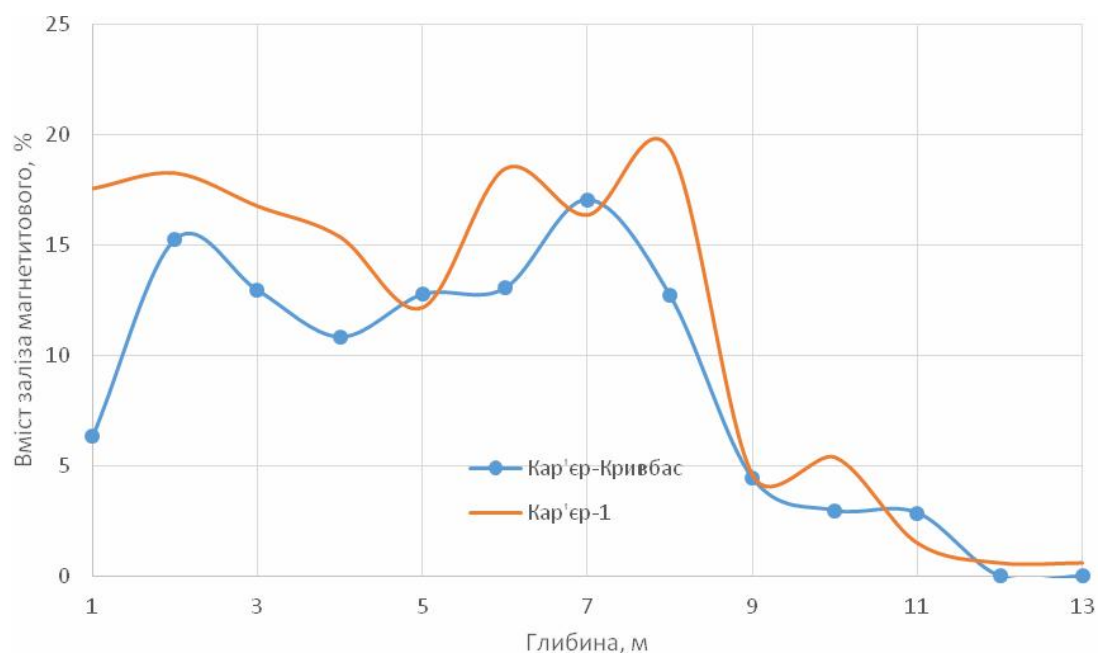


Рис. Д.14 Розподіл заліза магнетитового по глибині свердловини № 6 за даними двох станцій.

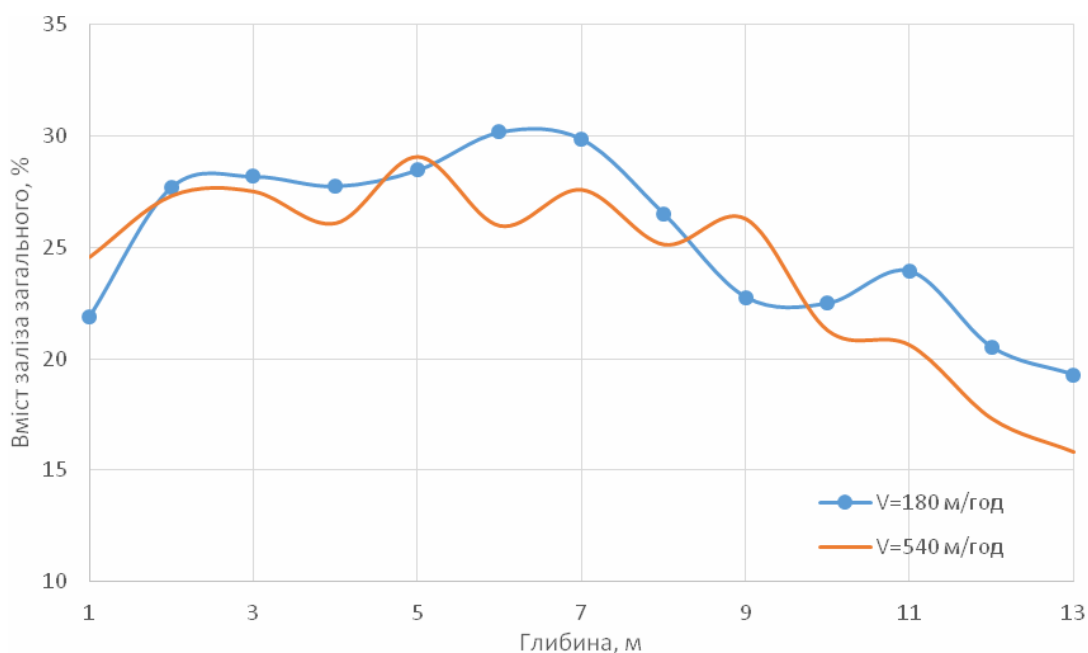


Рис. Д.15 Порівняння даних вимірювання розподілу вмісту заліза загального по глибині свердловини № 6 станцією «Кар'єр-Кривбас» на різних швидкостях підйому свердловинного пристрою.

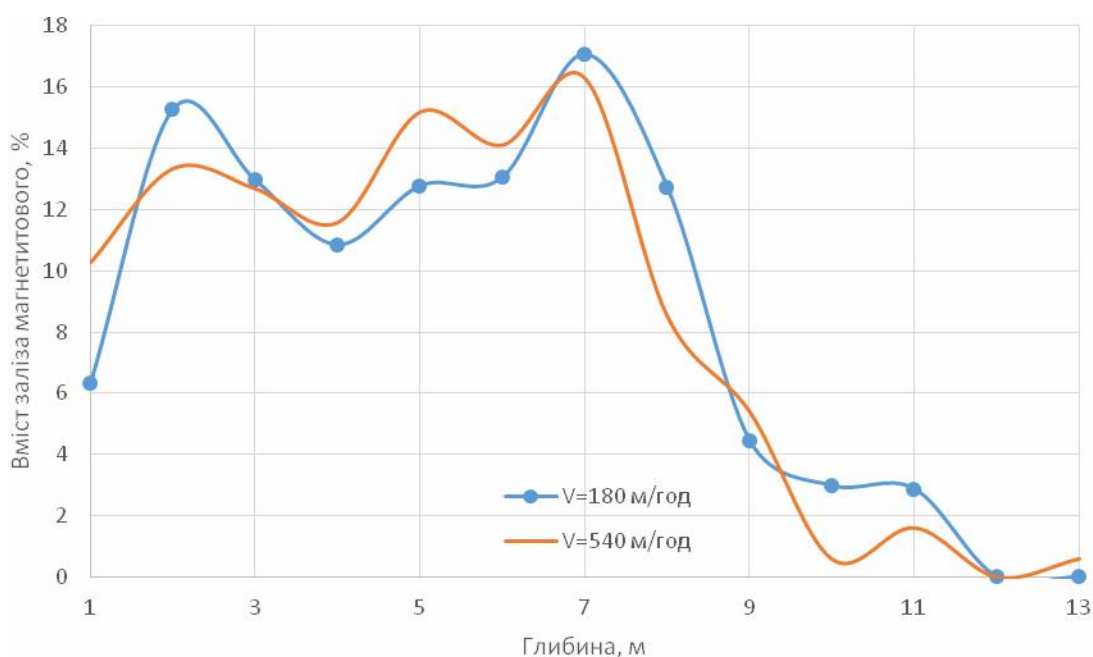


Рис. Д.16 Порівняння даних вимірювання розподілу вмісту заліза магнетитового по глибині свердловини № 6 станцією «Кар'єр-Кривбас» на різних швидкостях підйому свердловинного пристрою.

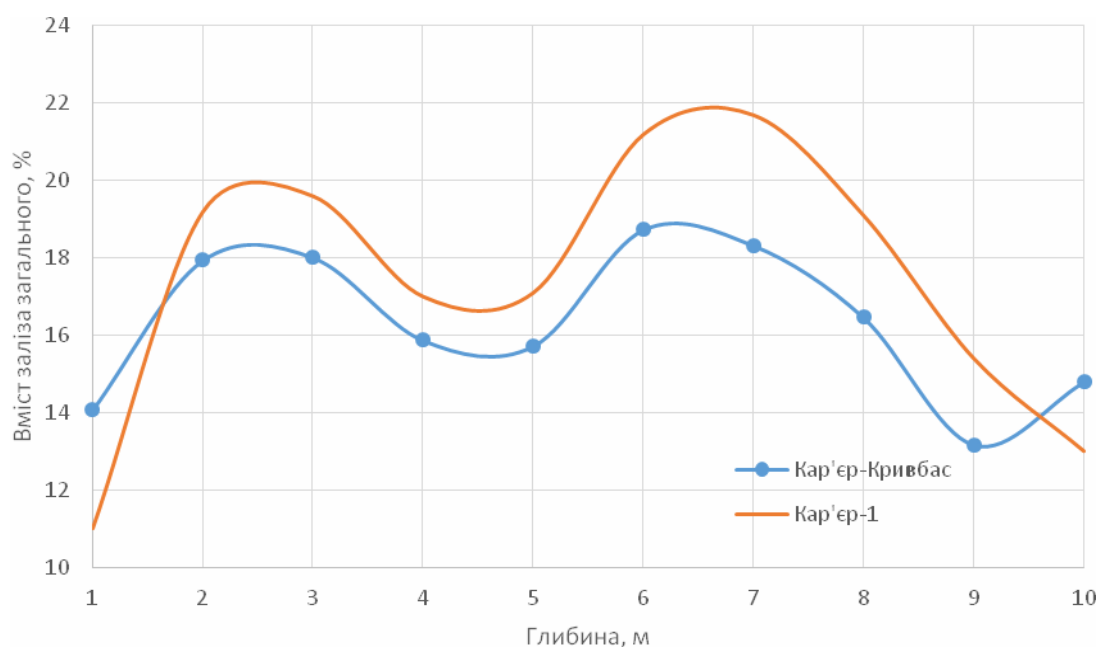


Рис. Д.17 Розподіл заліза загального по глибині свердловини № 7 за даними двох станцій.

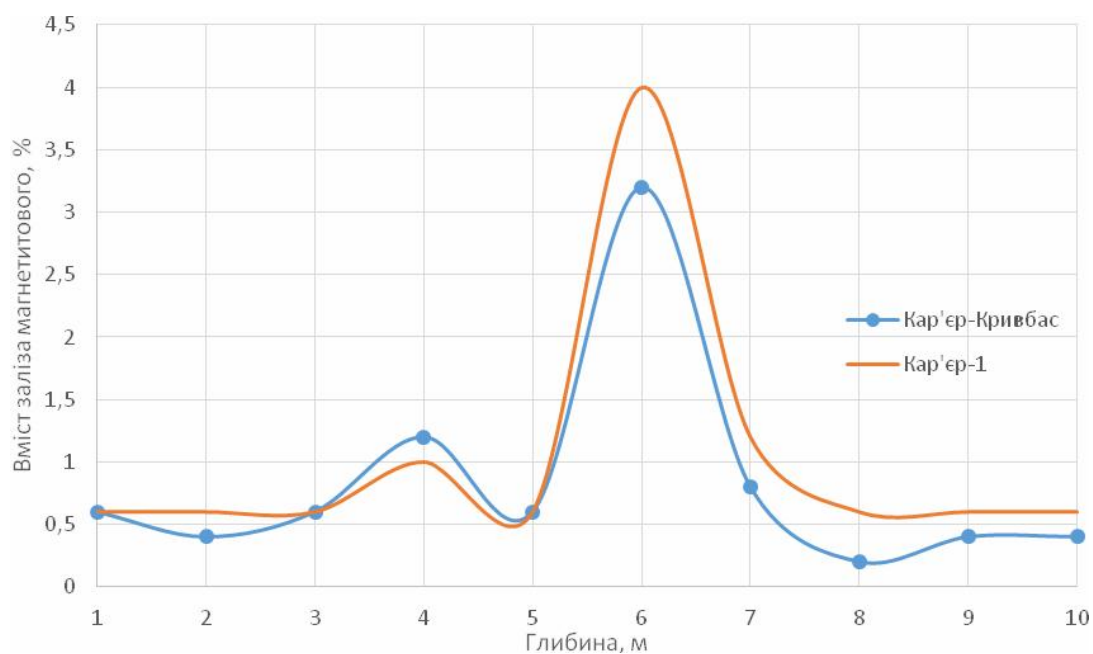


Рис. Д.18 Розподіл заліза магнетитового по глибині свердловини № 7 за даними двох станцій.

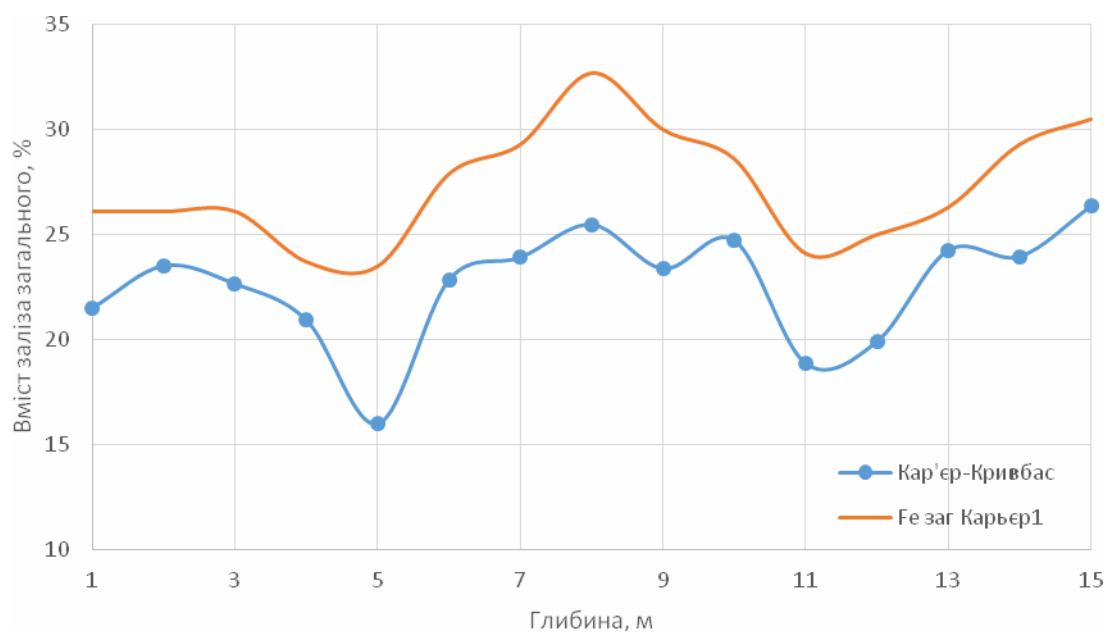


Рис. Д.19 Розподіл заліза загального по глибині свердловини № 8 за даними двох станцій.

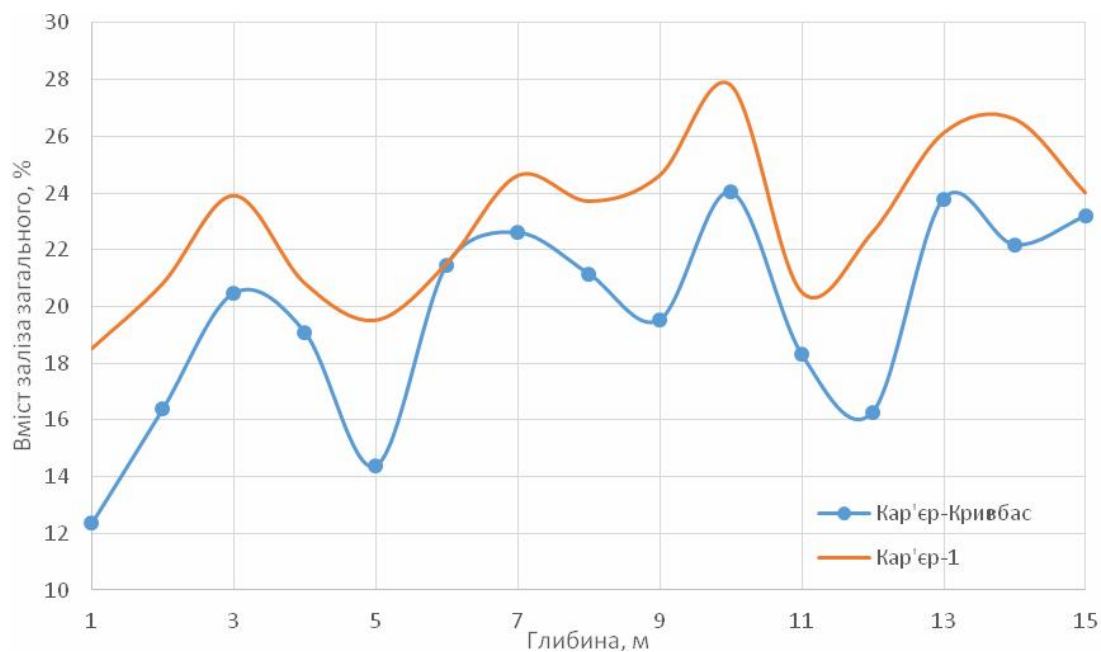


Рис. Д.20 Розподіл заліза магнетитового по глибині свердловини № 8 за даними двох станцій.

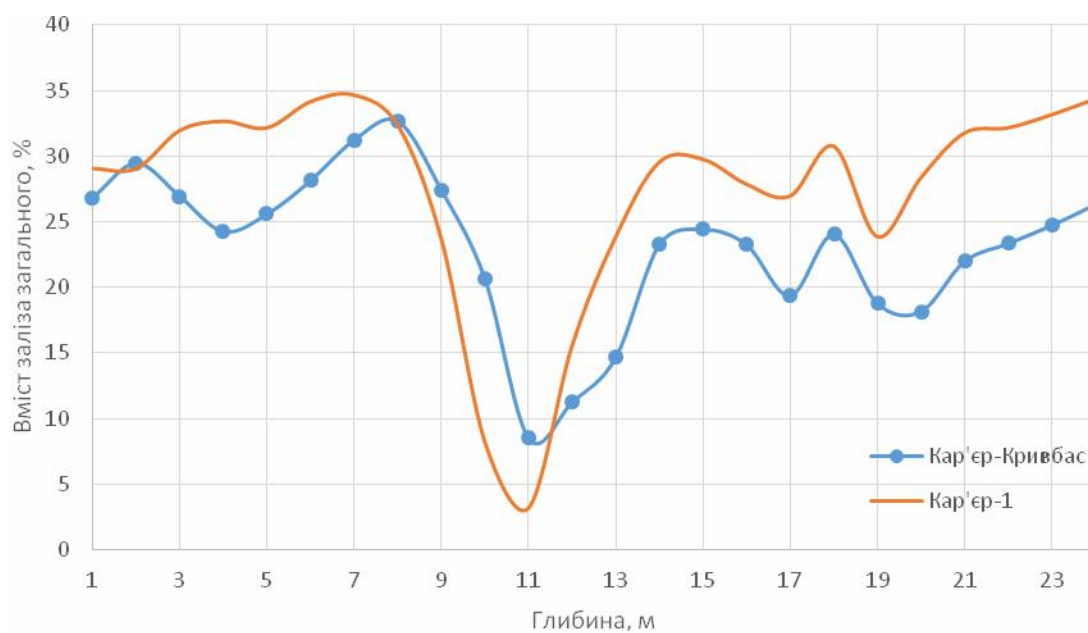


Рис. Д.21 Розподіл заліза загального по глибині свердловини № 9 за даними двох станцій.

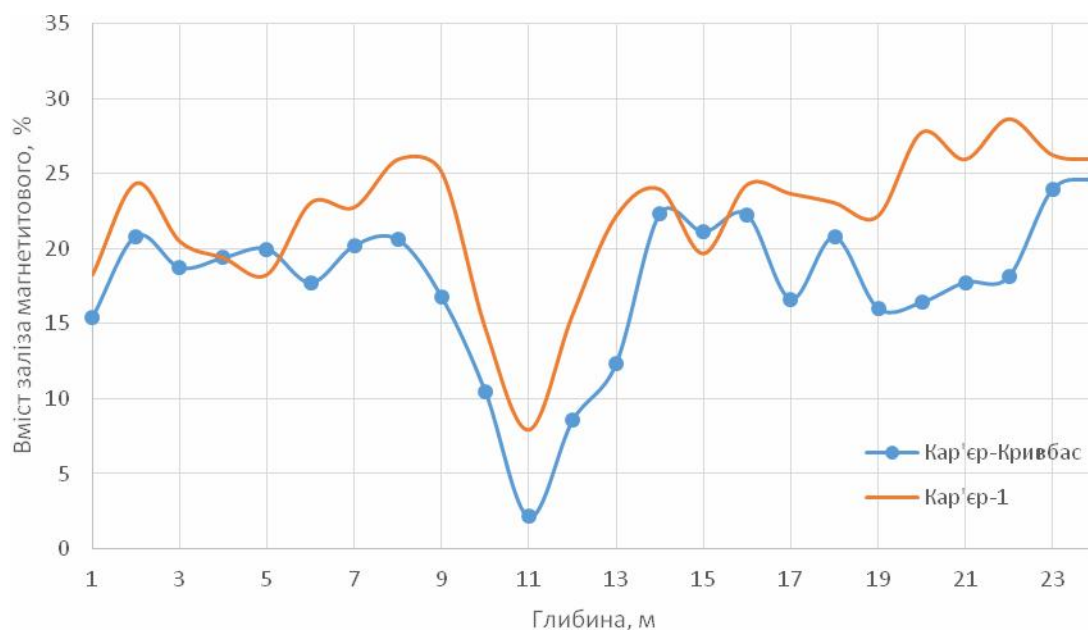


Рис. Д.22 Розподіл заліза магнетитового по глибині свердловини № 9 за даними двох станцій.

Додаток Е

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертаційної роботи:

1. Гриценко А. Н. Методы синхронного каротажа сухих и обводненных скважин / А.А. Азарян, А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького технічного університету». - 2011 - №27. – с. 258-262. *(Здобувачу належить ідея запропонованих методів, розробка алгоритму роботи, аналіз та узагальнення переваг запропонованих методів).*
2. Гриценко А.Н. Сравнительный анализ законов распределения железа связанного с магнетитом / А.Н. Гриценко // Журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность». – 2012 - №2. - с. 74-75
3. Гриценко А.Н. Мобильная станция для каротажа взрывных скважин / А.А. Азарян, А.Н. Гриценко // «Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління». – 2011 – №4 – с. 52-55. *(Здобувачем розроблено функціональну схему установки та принцип її роботи).*
4. Гриценко А.Н. Информационно-измерительная Система оперативного использования данных каротажа / А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2012 – №31 – с. 218-220.
5. Гриценко А.Н. Планирование горных работ с использованием информации о каротаже взрывных скважин / А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2013 – №34 – с. 32-34.
6. A. Gritsenko Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction / A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, D. Shvets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkiv, 2018 – №5/5(95)2018. –р. 13-19. *(Здобувачем виконані*

дослідження, запропоновано функціональну схему). Входить до наукометричної бази даних Scopus.

7. A. Gritsenko Using the intensity of absorber gamma radiation to control the content of iron in ore / A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, V. Serebrenikov, D. Shvets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkiv, 2019 – №3/5(99)2019. –р. 29-35. *(Здобувачем виконані математичні розрахунки, побудова залежностей).* Входить до наукометричної бази даних Scopus.

8. Гриценко А.Н. Разработка измерительного канала для оперативного контроля содержания железа магнитного во взрывных скважинах / А.А. Азарян, А.А. Трачук, А.Н. Гриценко, Д.В. Швец // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2019 -№1 – с. 138-145. *(Здобувачем розроблено функціональну схему, проведено дослідження, побудовано залежності).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Гриценко А.Н. Методика обработки данных по каротажу / А.В. Швыдкий, А.В. Черкасов, А.Н. Гриценко // Материалы международного симпозиума «Качество минерального сырья», КТУ, 18–23 июня 2012 г., м. Ялта.–Кривой Рог . – 2011 – с. 216-221. *(Здобувачем запропоновано ідею, виконані розрахунки, проведено промислові дослідження, узагальнено висновки).*

10. Гриценко А.Н. Использование информационно-вычислительных систем для каротажа скважин / А.Н. Гриценко // «Інформаційні управляючі системи та технології», Одеса 08-10 жовтня 2013 р.: Матеріали міжнародної наук.-практ. конф. Одеса – 2013 – с. 63-65.

11. Гриценко А.Н. Исследование и учет влияния воздушного зазора между датчиком и горной породой на точность определения содержания железа общего гамма-гамма методом / А.Н. Гриценко, В.В. Дрыга // Сьомий міжнародний симпозіум «Качество минерального сырья», Кривий Ріг – 09-11 вересня 2015 р : Матеріали симпозіума Кривий Ріг – 2014 – с. 238-247

(Здобувачем запропоновано ідею, виконано ряд досліджень та математична обробка результатів, сформульовано висновки).

12. Гриценко А.Н. Интегральный поток интенсивности рассеянного гамма-излучения как функция от параметров геометрии измерения / А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.Н. Гриценко, А.А. Трачук // Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Modern Scientific Achievements and Their Practical Application" (October 31, 2017, Dubai, UAE). сб. тр. №11(27), Vol.1, November 2017. – С. 18–24. *(Здобувачем виконані дослідження запропонованої ідеї, та побудова залежностей).*

13. Gritsenko A. Research of opportunities for increasing control accuracy of femag content in blastholes// A. Azaryan, A. Trachuk, D. Shvets, A. Gritsenko// 14-th international conference “Science and society”: Hamilton, Canada, 20 september 2019 // Materials conference Hamilton – 2019 - pp. 4-9. *(Здобувачеві належить ідея та опис функціональної схеми).*

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

14. Гриценко А.Н. Оперативный контроль и управление качеством при добыче и переработке минерального сырья / А.А. Азарян, В.А. Азарян, В.В. Дрига та ін.. –ОКТАН PRINT, Прага:2020 -500с.;*(Здобувачем виконано аналіз літературних джерел для розділу 2 та 4, дослідження розділу 3, математичні розрахунки розділу 8).*

15. Гриценко А.Н. Информационное обеспечение автоматизированной системы контроля качества при добыче железорудного сырья в условиях карьеров / А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.Н. Гриценко и др. // Науковий журнал «Інженерія програмного забезпечення». – 2012 – №2(10) – с. 17-25. *(Здобувачем доопрацьовано функціональну схему, розроблено алгоритми).*

16. Гриценко А.Н. Исследование взаимосвязи показаний ручного и комбинированного каротажного зонда при каротаже буровзрывных скважин / А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2015 – №40 – с. 73-77.

17. Гриценко А.Н. Исследование экспресс-анализа содержания общего железа в руде с использованием гамма-излучения / А.А. Азарян, А.Н. Гриценко // Збірник наукових праць «Вісник Криворізького національного університету». – 2016 – №43 – с. 79-84. *(Здобувачем проведено дослідження та виконано математичну обробку результатів дослідження, та побудову залежностей).*

18. Gritsenko A. N. Model gamma radiation in the interaction with rock formation / A.A. Azaryan, A.N. Gritsenko, A.A. Trachuk та ін. // International Journal of Robotics and Automation. – 2019 - Vol.8, No.4 – pp. 269-276 *(Здобувачем розроблено методику моделювання та інтерпретації результатів).*

19. Пат. №74623 Україна, G01V 5/00. Пристрій оперативного контролю вмісту корисного компонента в мінеральній сировині / [А.А. Азарян, А.М. Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник, Г.М. Лісовий та ін.]; заявл.16.03.12; опубл. 12.11.12; Бюл. №21. *(Здобувачем доповнено функціональну схему).*

20. Пат. №85059 Україна, G01V 5/00. Пристрій для каротажу свердловин / Гриценко А.М. ; заявл.26.04.13; опубл. 11.11.13; Бюл. №21.

21. Пат. №118167 Україна, G01V 5/04. Пристрій синхронного гамма-гамма-каротажу з електронним інклінометром / [А.А. Азарян, А.М. Гриценко, Д.Ю. Мірошник, С.В. Пилипенко, Ю.Є. Цибулевський та ін.]; заявл.13.02.17; опубл. 25.07.17; Бюл. №14. *(Здобувачем запропоновано функціональну схему).*

22. Пат. №119777 Україна, G01V 5/00. Пристрій оперативного контролю вмісту корисного компонента у мінеральній сировині / [А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.М. Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник та ін.]; заявл. 05.04.17; опубл. 10.10.17; Бюл. №19.*(Здобувачем розроблено алгоритм роботи пристрою).*

23. Пат. №121880 Україна, G01V 3/28. Пристрій для магнітного каротажу геофізичних свердловин / [А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.М.

Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник та ін.]; заявл.07.04.17; опубл. 26.12.2017; Бюл. №24. *(Здобувачем розроблено функціональну схему).*

24. Пат. №123234 Україна, G01V 5/12. Сверхдвоинный пристрій для селективного гамма-гамма каротажу / [А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.М. Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник та ін.]; заявл.05.04.17; опубл. 26.02.2018; Бюл. №4. *(Здобувачем запропоновано функціональну схему).*